

УДК 629.7.017.1

ОСОБЕННОСТИ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ХАРАКТЕРИСТИК ОТКАЗОБЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

С.А. КРОТОВ¹

¹ЗАО «ИФК ТЕХНИК», г. Москва, Россия

В статье рассмотрены ключевые этапы мониторинга необходимых параметров и событий в процессе эксплуатации воздушного судна. Приведены предпосылки к контролю специфического риска.

Анализируется понятие отказобезопасности функциональных систем воздушных судов и показана необходимость непрерывного процесса оценки реального уровня безопасности полетов.

Предложен метод количественной оценки вероятности ключевых событий и рисков с использованием современного программного обеспечения. Данный метод предусматривает 5 основных этапов:

1) установление контролируемых параметров – данный этап является входным и начинается с рассмотрения культуры безопасности организации, определения основных целей и задач, формирования основных параметров и характеристик, подлежащих контролю;

2) контроль событий в эксплуатации – на данном этапе происходит непрерывный процесс поиска и контроля ключевых событий, вызывающих интерес в рамках установленных задач. Данный процесс неизменно связан с контролем параметров, установленных на первом этапе;

3) оценка событий и рисков – данный этап начинается непосредственно после того, как выявлено определенное событие. Процесс оценки производится в объеме, необходимом для определения серьезности события. Он также включает в себя предварительную оценку риска для использования в приоритизации начальной расширенной оценки и в разработке плана по реализации мероприятий;

4) разработка плана мероприятий – на данном этапе определяются поправки, которые будут вносить изменения в процедуры разработки, эксплуатации, технического обслуживания авиационной техники и обучения персонала непосредственно в привязке к установленному ранее проблемному событию;

5) выполнение мероприятий – реализация действий согласно плану мероприятий. Данный этап включает приоритизацию, планирование и выполнение определенных задач.

Продемонстрирована зависимость, установленная между вероятностью возникновения отказных состояний и степенью их опасности. Обоснованы ключевые факторы, подлежащие оценке в процессе эксплуатации воздушных судов, направленные, в совокупности с анализом рисков, на повышение уровня безопасности полетов.

Ключевые слова: мониторинг параметров, отказобезопасность, специфический риск, контроль событий в эксплуатации.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с безопасностью полетов, являются важнейшими аспектами не только на стадии разработки и производства авиационной техники, но и особенно в процессе эксплуатации. Так, в рекомендации NTSB [1] указывается, что, единожды установив соответствие критически важных функциональных систем (ФС) сертификационному базису, необходимо иметь механизм обратной связи для обеспечения гарантии того, что представленная доказательная документация во время сертификации типа воздушного судна (ВС) непрерывно подкрепляется опытом эксплуатации.

В течение ряда лет проводилась оценка систем самолета на соответствие определенным требованиям по критерию «единичного отказа» или с использованием концепции отказобезопасной конструкции. Создание самолетов новых поколений потребовало выполнения более критичных с точки зрения безопасности полета функций, что в основном привело к усложнению конструкции систем, разработанных для выполнения этих функций.

Стали возможны потенциально опасные события для самолета и находящихся на борту людей, связанные с потерей системой одной или нескольких функций или неправильным функционированием этой системы, а также нарушением взаимодействия между системами, выполня-

ющими различные функции. Это привело к необходимости обеспечения обратного соотношения между вероятностью возникновения отказного состояния и критичностью его последствий для самолета и находящихся на борту людей. При оценке приемлемости конструкции систем самолета было признано, что должны быть установлены рациональные значения вероятностей отказных состояний в зависимости от критичности (тяжести, степени опасности) их последствий.

Мировой опыт эксплуатации показал, что вероятность авиационного происшествия по причинам, связанным с эксплуатационными факторами и с конструкцией планера и систем самолета, составляет приблизительно один случай на миллион часов налета. При этом около 10 процентов от общего числа летных происшествий были связаны с отказными состояниями систем самолета.

При проектировании новых самолетов будет целесообразно не допускать более высокую вероятность авиационных происшествий, причиной которых являются отказы систем. Поэтому следует потребовать, чтобы для вновь создаваемых самолетов суммарная вероятность возникновения катастрофы (авиационного происшествия с человеческими жертвами) по причине отказных состояний систем была не больше чем 1 случай на 10 миллионов летных часов или $1 \cdot 10^{-7}$ на час полета. Трудность при этом заключается в том, что до проведения вероятностного анализа отказных состояний всех систем самолета с оценкой их последствий невозможно сказать, будет ли обеспечен такой уровень вероятности. По этой причине условно приняли, что на самолете существует около 100 потенциальных отказных состояний, которые могут быть катастрофическими. Принятая допустимая вероятность катастрофы $1 \cdot 10^{-7}$ на час полета может быть равномерно распределена между этими отказными состояниями. Таким образом, полученное допустимое значение вероятности каждого катастрофического отказного состояния составляет величину порядка $1 \cdot 10^{-9}$ на час полета. Верхнее предельное значение для средней вероятности на час полета катастрофических отказных состояний принимается равным $1 \cdot 10^{-9}$ и устанавливает примерное значение вероятности для термина «практически (крайне) невероятный» (Extremely Improbable). Возникновение отказных состояний, имеющих менее тяжелые последствия, соответственно может быть более вероятным.

Расчет отказобезопасности ФС производится на основе анализа видов отказов и выражается в виде допустимой вероятности возникновения на борту ВС отказов, которые могут привести к особым ситуациям различной степени опасности.

Оценку последствий отказов ФС ВС проводят на основе анализа отклонений определяющих параметров при возникновении отказа на различных этапах и режимах полета с оценкой возможности парирования отказа и завершения полета с данным отказом [2, 6]. Таким элементом анализа, как виды отказов, последствия отказов, интенсивности отказов, функции распределения вероятностей отказов, времена воздействия (существования) отказов может быть свойственна изменчивость, что, безусловно, влияет на базовые результаты [3, 7–10]. Поэтому мониторинг отказобезопасности в процессе эксплуатации приобретает особую актуальность.

Такой мониторинг может быть осуществлен на базе авиационного стандарта [4], который гласит, что для улучшения показателей безопасности во время всего жизненного цикла ВС недостаточно полагаться на критерии безопасности, заложенные при разработке ВС. Данный стандарт распространяется на эксплуатантов, производителей АТ, поставщиков оборудования, центры ТОиР и авиационные власти (рис. 1).

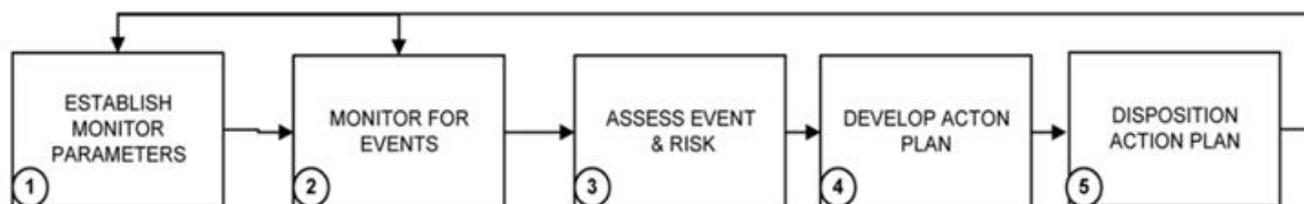


Рис. 1. Непрерывный процесс оценки безопасности
Fig. 1. Continuous process of safety evaluation

ЭТАПЫ МОНИТОРИНГА

1. Установление контролируемых параметров – данный этап является входным и начинается с рассмотрения культуры безопасности организации, определения основных целей и задач, формирования основных параметров и характеристик, подлежащих контролю. В качестве базовой информации предлагается использовать вспомогательные перечни примерных существенных отказов (событий), влияющих на безопасность полета. Могут использоваться перечни отказов, устанавливаемых как производителем ВС, так и авиакомпанией, а также перекрестные перечни (производителя и авиакомпании). В табл. 1 указан перечень существенных отказов.

Таблица 1
Table 1

Перечень существенных отказов
List of Significant Failures

Function	ATA	Significant Failure/Item
Mech System	32	Brake Failure Events
Mech System	32	Main Gear Steering Events
Mech System	32	Nose Gear Steering Events
Mech System	32	Tire Burst / Failure Events: In Wheel Well during Flight
High Lift	27	Failure of load relief
High Lift	27	Flap / Slat Asymmetry Events In flight

В перечне указывается код системы по АТА, основная задействованная функция и сам существенный отказ либо группы событий, связанные с нарушением функционирования.

Как правило, такие списки основываются на результатах оценки функциональной опасности (ФНА) – систематическом, всестороннем исследовании функций самолета и его систем с целью определения потенциальных незначительных, значительных, аварийных и катастрофических отказных состояний, которые могут возникнуть не только как результат нарушения или потери функции, но и как результат реакции системы на необычные или нештатные внешние факторы. Каждая функция системы должна быть исследована с учетом влияния на другие функции, выполняемые системой, поскольку потеря или неисправность всех или нескольких функций, выполняемых системой, может привести к более тяжелому отказному состоянию, чем потеря единичной функции.

Большое значение имеет процесс изучения накопленного опыта в рамках улучшения подхода к оценке безопасности. При этом особое внимание следует уделить следующим аспектам:

- рассмотрению и тщательному анализу новых видов отказов,
- всесторонней оценке последствий отказов (а также детальной оценке в привязке к соответствующему уровню риска) при рассмотрении реальных ситуаций в эксплуатационных условиях с участием человеческого фактора и воздействия окружающей среды.

2. Контроль событий в эксплуатации – на данном этапе происходит непрерывный процесс поиска (мониторинг) и контроля ключевых событий, вызывающих интерес в рамках установленных задач. Данный процесс неизменно связан с контролем параметров, установленных на первом этапе. В отношении непосредственно эксплуатации воздушного судна стоит отметить, что, если мониторинг и информация об отказах ведется в рамках какой-либо контролируемой системы, уровень ее надежности должен соответствовать требованиям по безопасности, связанным с функцией системы, для которой обеспечивается такая индикация. Например, если какой-либо отказ при отсутствии сигнализации об этом отказе, и, как следствие, отсутствии необходимых корректирующих действий, может иметь катастрофические последствия, комбинация этого отказа с отказом сигнализации о нем должна быть практически невероятной. Кроме того, следует оценить нежелательное срабатывание сигнализации (например, мешающие предупреждения). Системы монито-

ринга и информации об отказах должны использовать эффективные и высоконадежные технологические средства, чтобы максимально увеличить вероятность обнаружения реально возникающих отказов при сведении к минимуму вероятности ложного срабатывания индикации об отказах. Любая индикация должна быть своевременной, очевидной, ясной и недвусмысленной [3].

3. Оценка событий и рисков – данный этап начинается непосредственно после того, как выявлено определенное событие. Процесс оценки производится в объеме, необходимом для определения серьезности события. Он также включает в себя предварительную оценку риска для использования в приоритизации начальной расширенной оценки и в разработке плана по реализации мероприятий.

4. Разработка плана мероприятий – на данном этапе определяются поправки, которые будут вносить изменения в процедуры разработки, эксплуатации, технического обслуживания авиационной техники и обучения персонала непосредственно в привязке к установленному ранее проблемному событию.

5. Выполнение мероприятий – реализация действий согласно плану мероприятий. Данный этап включает приоритизацию, планирование и выполнение определенных задач.

При оценке событий и рисков используются следующие инструменты:

– Qualitative Risk Assessment (качественная оценка риска) – производится нечисловая оценка риска. Применяются положения MIL-STD-882D, FAA Advisory Circular 25.1309-1A;

– Quantitative Risk Assessment (количественная оценка риска) – ключевым элементом является расчет вероятности возникновения определенного события. В качестве примера элемента анализа на рис. 2 представлена схема визуализации риска для парка ВС.

Анализ производился для событий, попадающих в определенную категорию (Level 4 – Severe Consequence) с тяжкими последствиями в соответствии с СААМ (Continued Airworthiness Assessment Methodologies). Граница Lower Boundary указывает на то, что риск находится в пределах $1.E-09$, является приемлемым и, соответственно, никаких корректирующих действий не требуется. Граница Upper Boundary указывает на то, что риск будет превышен и в отношении определенных ВС следует предпринять корректирующие действия перед полетом:

– Root Cause (Event Tree) Analysis (анализ коренных причин) – производится многоуровневый анализ с помощью дерева событий;

– Weibull Analysis – анализ с использованием распределения Вейбулла;

– Reliability Growth Modeling – моделирование роста надежности;

– Monte Carlo Analysis – анализ методом Монте-Карло.

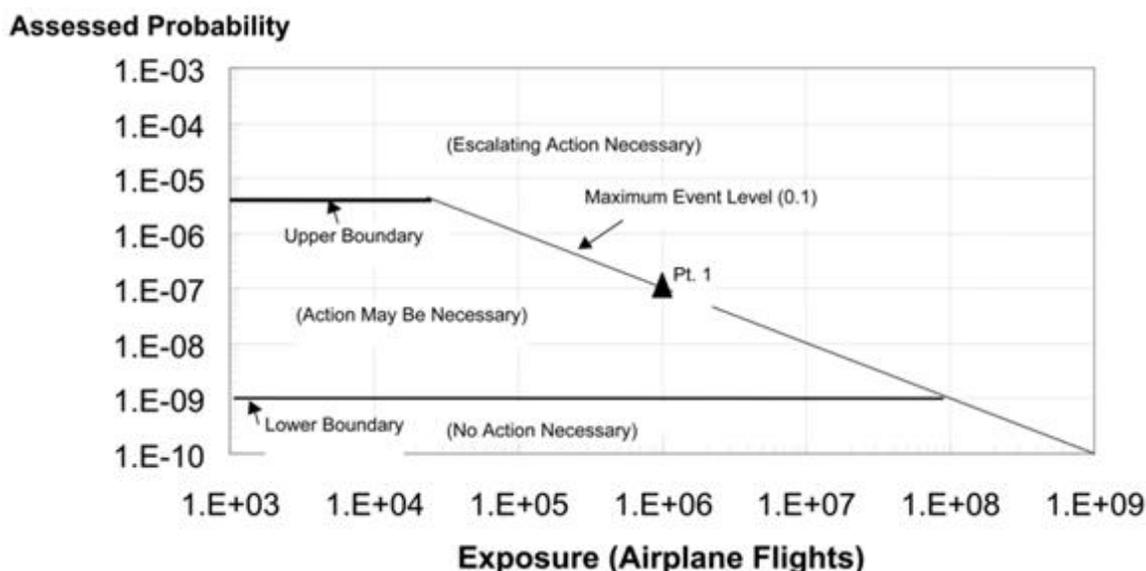


Рис. 2. Схема визуализации риска для парка ВС
Fig. 2. Chart of risk visulisation of aircraft fleet

Возвращаясь к оценке риска, стоит отметить, что на сегодняшний день по-прежнему является актуальной оценка специфического риска (Specific risk). В отчете [5] дается следующее определение: «Специфический риск – риск для данного полета в связи с возникновением особого условия». Также выделяется следующий термин: «Specific risk of concern – состояние, когда ВС отделяет от катастрофы один отказ или когда величина риска выше, чем средняя вероятность возникновения аварийной или катастрофической ситуации, определенная в АС/АМЈ 25.1309 для данного полета в связи с возникновением особого условия». На рис. 3 представлено графическое изображение специфического риска.

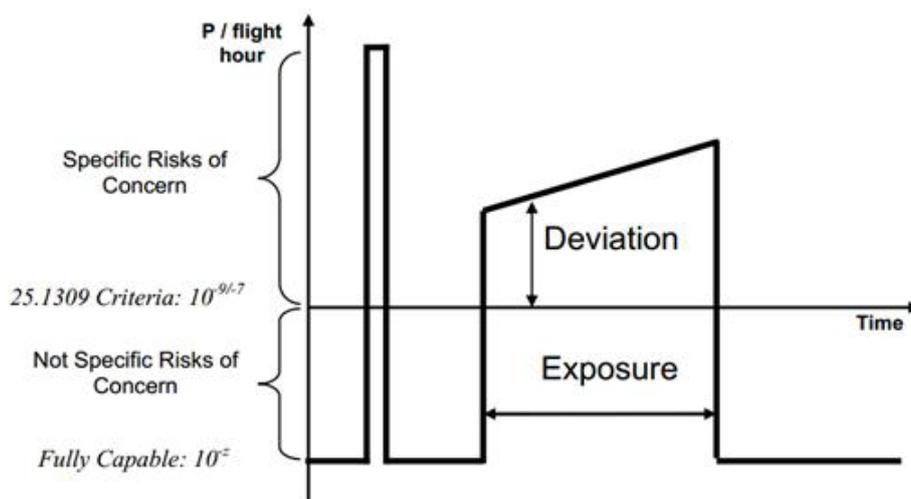


Рис. 3. Графическое представление специфического риска
Fig. 3. Graphical presentation of specific risk

По оси ординат указывается вероятность возникновения аварийной или катастрофической ситуации, а также отклонение (Deviation) в зону специфического риска. По оси абсцисс указывается полетное время (в летных часах), а также период воздействия специфического риска (Exposure). На рис. 4 представлена графическая зависимость между степенью опасности отказных состояний и средней вероятностью их возникновения, в том числе для аварийной и катастрофической ситуации. При этом в соответствии с [5] к особым условиям относят следующие ключевые определения:



Рис. 4. Зависимость между средней вероятностью возникновения отказных состояний на час полета и их степенью опасности

Fig. 4. Dependence between average probability of failure per flight hour and their risk level

- MMEL (выход в рейс);
- Latent Failure (скрытый отказ). Отказ является скрытым до тех пор, пока он не выявлен экипажем или персоналом, выполняющим техническое обслуживание. Нежелательно полагаться на выполнение периодических проверок при техническом обслуживании или проверок летным экипажем в качестве единственного средства выявления существенных скрытых отказов. Такие проверки не должны заменять собой реальную и надежную систему мониторинга и информации об отказах;
- Active Failure (активный отказ);
- At Risk Time. Период времени, в течение которого объект может отказать с возникновением интересующих последствий отказа. Это обычно связано с конечной неисправностью в последовательности неисправностей, ведущей к конкретному отказному состоянию;
- Flight Phase (этап полета). Включает в себя руление, взлет, набор высоты, крейсерский режим, снижение, посадку.

В отношении вычисления средней вероятности возникновения отказного состояния на час полета следует также учитывать следующие определения и характеристики:

- средняя вероятность на час полета – это нормализованная по времени полета вероятность возникновения отказного состояния в течение полета, которая может рассматриваться как осредненная вероятность по всем возможным полетам парка самолетов сертифицируемого типа;
- средняя продолжительность полета и типовой профиль полета;
- все комбинации отказов и событий, которые приводят к данному отказному состоянию;
- условные вероятности возникновения отказов и событий, приводящих к отказному состоянию, если определенная последовательность событий является необходимой для того, чтобы вызвать рассматриваемое отказное состояние;
- соответствующее время «риска», если какое-либо событие является значимым (возможно или играет роль) только на определенных этапах полета;
- среднее время существования отказа (exposure time), если какой-либо отказ может существовать в течение многих полетов.

Интенсивности отказов отдельных деталей, компонентов и узлов, используемые при расчете средней вероятности на летный час, должны представлять собой установившиеся постоянные значения интенсивностей отказов после периода начальной приработки и до выработки ресурса (износа). Эти значения должны учитывать все причины отказа (эксплуатационные, связанные с внешними факторами и т. д.). При наличии соответствующих данных следует учитывать опыт эксплуатации идентичных или сходных компонентов в идентичных или сходных условиях окружающей среды.

Если отказ может иметь место только на определенных этапах полета, расчет должен основываться на вероятности отказа в течение соответствующего времени риска его возникновения.

Если один или большее число элементов (компонентов) системы могут находиться в состоянии отказа в течение нескольких полетов (латентные, не проявившиеся или скрытые отказы), при расчете вероятностей отказных состояний необходимо учитывать соответствующие времена возможного нахождения таких элементов в состоянии отказа (например, интервалы времени между проведением проверок функционирования/инспекций и восстановлением работоспособности соответствующего элемента). В таких случаях вероятность возникновения отказного состояния увеличивается с увеличением периода латентности (числа полетов, в которых могут существовать скрытые отказы).

При изменении интенсивности отказа какого-либо элемента в течение различных этапов полета, при расчете следует учитывать изменение значения интенсивности отказа такого элемента и соответствующие приращения времени таким образом, чтобы установить вероятность возникновения отказного состояния в «среднем полете».

В тех случаях, когда рассматриваемые последствия (отказное состояние) наступают только тогда, когда отказы возникают в определенном порядке, при расчете вероятности возникновения отказного состояния необходимо учитывать вероятность возникновения отказов в последовательности, необходимой для его возникновения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в общем виде рассмотрены этапы всестороннего мониторинга эксплуатационных параметров воздушного судна, выявлены ключевые факторы, подлежащие оценке в эксплуатации, приведены особенности выполнения анализа риска, что в совокупности позволяет создавать условия для повышения уровня безопасности полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Safety Recommendation A-06-038, National Transportation Safety Board, US, 2006.
2. ОСТ 1 02785-2009. Воздушные суда гражданской авиации. Эксплуатационно-технические характеристики. Общие требования. М.: ФГУП «НИИСУ», 2010. 28 с.
3. РЦ 25.1309. Разработка методики определения соответствия самолетного оборудования требованиям авиационных правил / Авторский коллектив Некоммерческого партнерства «Союз авиапроизводителей» под руководством А.Г. Колосова. М., 2015. 43 с.
4. Safety Assessment of Transport Airplanes in Commercial Service SAE ARP5150 (Warrendale, Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, 2003).
5. ARAC Airplane-level Safety Analysis Working Group (ASAWG) Specific Risk tasking report, version 5.0, dated April 2010.
6. Александровская Л.Н. Безопасность и надежность технических систем: учеб. пособие / Л.Н. Александровская, И.З. Аронов, В.И. Круглов и др. М.: Университетская книга; Логос, 2008. 376 с.
7. Гипич Г.Н., Чинючин Ю.М. Введение в теорию рисков // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 160. С. 7–11.
8. Дашков И.Д., Зубков Б.В. Определение и оценка состояний функциональных систем воздушных судов в системе управления безопасностью полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 32–36.
9. Кротов С.А. К вопросу о контроле отказобезопасности функциональных систем воздушных судов в процессе эксплуатации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 197. С. 79–84.
10. Кротов С.А. Концепция эксплуатационной модели отказобезопасности // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 37–43.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Кротов Станислав Александрович, инженер отдела материально-технического обеспечения ЗАО «ИФК ТЕХНИК», krotov-sa@mail.ru.

THE FEATURES OF AIRCRAFT FUNCTIONAL SYSTEMS PERFORMANCE MONITORING

Stanislav A. Krotov¹
¹*IFC TECHNIK JSC, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The key steps of aircraft essential parameters and events monitoring during its operation are considered in the article. Conditions for specific risk monitoring are also presented.

The notion of fail-safe feature of aircraft functional systems is analysed, and the necessity of continuous process of safety flight level estimate is shown. The method of quantitative assessment of key events and risks probabilities with the use of modern software is proposed. This method contains 5 basic stages:

1. The monitoring parameters setting – this stage is initial and begins with the consideration of organization safety culture, the main purposes and problems determination, the basic parameters and characteristics forming which are to be monitored.

2. The event monitoring in operation – on this stage continuous process of key events searching and monitoring which are a thing of importance within the framework of the established problems takes place. This process is closely related to parameters monitoring set on the first stage.

3. The event and risk estimate – this stage begins directly after the event has been discovered. The estimate process is as long as it is required to identify the event gravity. It also contains the preliminary risk estimate for using in prioritization of initial expanded estimate and in the working out of plan for activities realization.

4. The working out of plan for activities – on this stage correction data is determined that will make changes to aerotechnics working out, operation, maintenance and to staff training directly in linkage to the problem event identified earlier.

5. The activity carrying-out – the realization of actions according to the activity plan. This stage concludes prioritization, planning and problem carrying-out.

The dependence set between the probability of failure situations and the degree of their danger is shown. The key factors which are subject to be estimated while aircraft operating and which aim with risk analysis to increase the safety flight level are justified.

Key words: parameters monitoring, fail-safe feature, specific risk, events monitoring in operation.

REFERENCES

1. Safety Recommendation A-06-038, National Transportation Safety Board, US, 2006.
2. OST 1 02785-2009. *Vozdushnyie suda grazhdanskoy aviatsii. Ekspluatatsionno-tehnicheskie harakteristiki. Obschie trebovaniya* [Aircraft Civil Aviation. Operational and technical characteristics. General requirements]. Moscow, FGUP "NIISU", 2010, 28 p.
3. *RTs 25.1309. Razrabotka metodiki opredeleniya sootvetstviya samoletnogo oborudovaniya trebovaniyam aviatsionnykh pravil. Avtorskiy kolektiv Nekommercheskogo partnerstva «Soyuz aviaprodukteley» pod rukovodstvom A.G. Kolosova* [RC 25.1309. Development of methods for determining compliance with the aircraft equipment requirements of aviation regulations. Authors of Non-Commercial Partnership "Union of Aviation Industrialists" led by A.G. Kolosov]. Moscow, 2015, 43 p.
4. Safety Assessment of Transport Airplanes in Commercial Service SAE ARP5150 (Warrendale, Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, 2003).
5. ARAC Airplane-level Safety Analysis Working Group (ASAWG) Specific Risk tasking report, version 5.0, dated April 2010.
6. **Aleksandrovskaya L.N.** *Bezopasnost i nadezhnost tehnikeskikh sistem* [Safety and reliability of technical systems. Tutorial]. L.N. Aleksandrovskaya, I.Z. Aronov, V.I. Kruglov i dr. Moscow, *Universitetskaya kniga* [University book], Logos, 2008. 376 p.
7. **Gipich G.N., Chinyuchin Yu.M.** *Vvedenie v teoriyu riskov* [Introduction to the theory of risks]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2010, no. 160, pp. 7–11.
8. **Dashkov I.D., Zubkov B.V.** *Opredelenie i otsenka sostoyaniy funktsionalnykh sistem vozdushnykh sudov v sisteme upravleniya bezopasnostyu poletov* [Identification and assessment of the state of the functional systems of aircraft safety management system]. The Scientific Bulletin of the MSTUCA, 2014, no. 205, pp. 32–36.
9. **Krotov S.A.** *K voprosu o kontrole otkazobezopasnosti funktsionalnykh sistem vozdushnykh sudov v protsesse ekspluatatsii* [On the question of control fail-functional systems of aircraft in operation]. The Scientific Bulletin of the MSTUCA, 2013, no. 197, pp. 79–84.
10. **Krotov S.A.** *Kontseptsiya ekspluatatsionnoy modeli otkazobezopasnosti* [The concept of a safety-failure model]. The Scientific Bulletin of the MSTUCA, 2014, no. 205, pp. 37–43.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Krotov Stanislav Alexandrovich, Post Graduate of Moscow State Technical University of Civil Aviation, krotov-sa@mail.ru.