

УДК 629.7.017.1

## ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ МОДЕЛИ ОТКАЗОБЕЗОПАСНОСТИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Н.Н. СМИРНОВ, С.А. КРОТОВ

В статье рассмотрены аспекты формирования модели отказобезопасности, предложен порядок действий по оценке функциональной опасности на уровне планера, выделены ключевые задачи контроля надежности и безопасности полета совместно с анализом видов, последствий и критичности отказов.

**Ключевые слова:** отказобезопасность, оценка функциональной опасности воздушных судов, анализ критичности.

Безопасность полета самолета зависит от функционирования самолета и функционирования всех звеньев авиационно-транспортной системы. На современном уровне развития авиационной науки и техники невозможно создать абсолютно безотказные технические системы. Проектирование новых самолетов ведется с учетом принципа обеспечения отказобезопасности, при котором благополучное завершение полета с отказавшей системой становится возможным благодаря применению резервирования и дублирования. В работах [1; 2; 3] было предложено выделить и рассмотреть эксплуатационный контроль и концепцию модели отказобезопасности.

Особенностью подхода к формированию модели является выделение технического облика каждого самолета. Контроль динамики изменения характеристик надежности в зависимости от «возраста» воздушного судна (ВС) должен осуществляться на уровне комплектующего изделия (КИ), функциональной системы (ФС) и ВС в целом. Этап эксплуатации ВС рассматривается как этап, на котором окончательно подтверждаются все характеристики надежности и безопасности и на котором могут быть выявлены новые, ранее не проявившиеся в процессе эксплуатации аналогов обстоятельства, влияющие на безопасность полета. Они должны быть немедленно устранены на всем эксплуатируемом парке и учтены в будущих конструкциях ВС. Для этого должна быть создана система сбора и обработки информации, необходимая для оценки достигнутого эксплуатационного уровня надежности и безопасности полета ВС, его систем и агрегатов. Вся информация о выявленных отказах, налетах ВС, выполненных формах технического обслуживания должна поступать непосредственно от эксплуатанта к разработчику ВС. У разработчика информация от всех эксплуатантов проходит соответствующий контроль. Разработчик ВС формирует единую базу данных по полученной информации и предоставляет ее всем разработчикам комплектующих изделий, серийному заводу, выпускающему ВС, и другим заинтересованным предприятиям. В случае выявления новых, непредусмотренных эксплуатационной документацией событий, информация о них и мероприятия по их парированию доводится до всех эксплуатантов [4].

Однако важной проблемой по прежнему остается полнота оценки уровня отказобезопасности воздушных судов. Приоритетными задачами является определение перечня функций систем ВС, определение перечня потенциально возможных нарушений функций (отказных состояний, функциональных отказов, видов отказов системы) систем воздушных судов, а также определение последствий каждого ФО для пассажиров, экипажа и ВС в целом и оценка степени опасности (уровня критичности, степени риска) для каждого из функциональных отказов.

В соответствии с Руководством № 4761 [5] приоритетной задачей оценки безопасности систем является оценка функциональной опасности (Functional Hazard Assessment – ФНА). Целью ФНА является рассмотрение функций на наиболее приемлемом уровне, выявление и классификация возникающих отказных состояний вследствие как потери функций, так и их неправиль-

ного выполнения. ФНА должна выявлять отказные состояния для каждого этапа полета, если воздействие отказа и классификация состояния изменяется от одного этапа к другому.

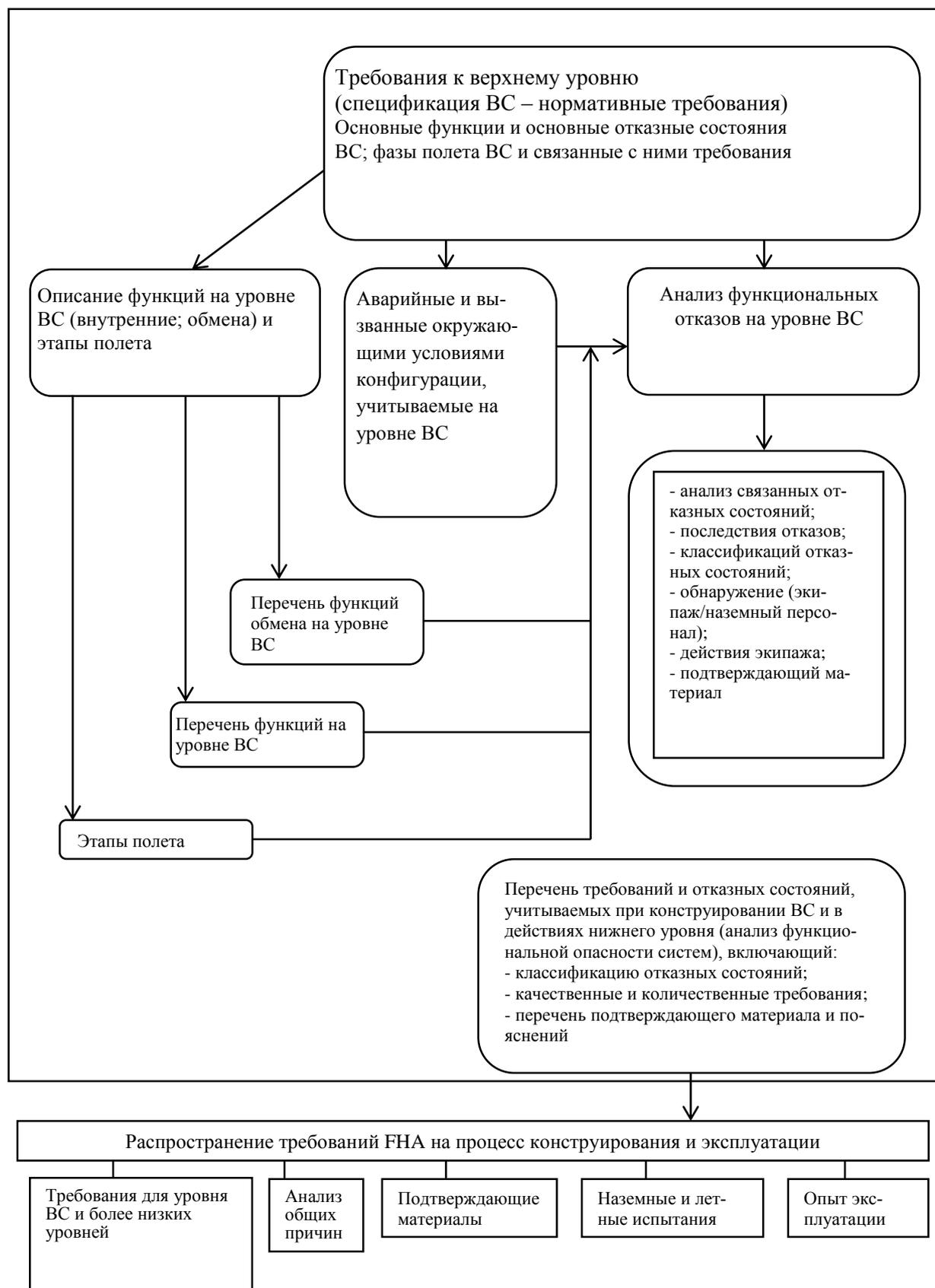


Рис. 1. Оценка функциональной опасности на уровне ВС

Оценка функциональной опасности может выполняться на двух уровнях - на уровне ВС и на уровне системы. Выполняемые на этих двух уровнях ГНА, используют одни и те же принципы. На рис. 1 изображена структура оценки функциональной опасности на уровне ВС. Процесс идентификации отказных состояний начинается с создания перечня вариантов окружающих условий и аварийных конфигураций. Затем рассматриваются все пункты перечня внутренних функций, перечня функций обмена и перечня вариантов окружающих условий и аварийных/ненормальных конфигураций. Затем создается перечень отказных состояний для ВС или системы рассмотрением единичных и множественных отказов в нормальных и ухудшенных окружающих условиях. Порождая эти отказные состояния и предположения об условиях их возникновения, необходимо учитывать возможные виды каждого отказа. Примерами условий внешней среды, рассматриваемых на уровне ВС, являются: погодные условия, электромагнитное поле высокой интенсивности, вулканический пепел и т.д. К аварийным/ненормальным условиям на уровне ВС/системы можно отнести: вынужденная посадка, отказ двигателя, потеря связи, разгерметизация.

В качестве инструмента систематического анализа видов отказов является анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО). Как правило, для выполнения такого анализа необходима следующая информация:

1) требования к АВПКО, включая связанные с безопасностью, запрашиваемые последствия отказа и интересующие специфические режимы эксплуатации;

2) спецификации;

3) действующие чертежи и схемы;

4) перечень элементов каждой системы или объекта;

5) функциональные блок-схемы;

6) пояснительный материал, включая принципы работы;

7) перечень применимых интенсивностей отказов;

8) любые изменения и уточнения конструкции, которые пока не нашли отражения в схемах.

Ниже, в соответствии с [6], представлен количественный анализ критичности видов отказов.

Для этого необходим анализ по следующим параметрам:

1. Для каждого анализируемого элемента - интенсивность отказов  $i$ -го элемента  $\lambda_i$ .

2. Для каждого вида отказа анализируемого элемента — доля  $j$ -го вида отказа  $i$ -го элемента  $\alpha_{ij}$ . Если для элемента описан только один вид отказа, то  $\alpha_{ij} = 0$ . Если для элемента описано несколько видов отказов, то должно выполняться условие

$$\sum_{j=1}^J \alpha_{ij} = 1,$$

где  $j$  — количество видов отказов элемента.

Если  $\sum_{j=1}^J \alpha_{ij} < 1$ , то это означает, что описаны не все возможные виды отказа элемента.

Рассмотрим такой параметр, как вероятность возникновения последствия  $K$ -й категории тяжести последствий отказа (КТПО) для  $j$ -го вида отказа  $i$ -го элемента  $\beta_{ij}^K$  ( $K = 1, 2, 3, 4$ ). Если для вида отказа описано несколько возможных последствий с разными КТПО, то необходимо определить вероятность возникновения последствия с наихудшим значением КТПО. Категории рассматриваются следующим образом:

катастрофическая ситуация (КС) — примерно соответствует категории 1;

аварийная ситуация (АС) — примерно соответствует категории 1;

сложная ситуация (СС) — примерно соответствует категории 2;

усложнение условий полета (УУП) — примерно соответствует категории 3;

без последствий (БП) — примерно соответствует категории 4.

Используя параметр  $\beta_{ij}^K$ , рассчитывается число критичности  $j$ -го вида отказа  $i$ -го элемента по формуле

$$Cm_{ij}^K = \beta_{ij}^K \cdot \alpha_{ij} \cdot \lambda_i \cdot (T_{\text{раб.}})_i, \quad (1)$$

где  $Cm_{ij}^K$  – число критичности  $j$ -го вида отказа  $i$ -го элемента  $K$ -й (наихудшей) категории тяжести последствий;

$(T_{\text{раб.}})_i$  – наработка  $i$ -го элемента за время миссии  $T_{\text{миссии}}$ .

Как следует из (1), число  $Cm_{ij}^K$  равно количеству отказов  $j$ -го вида  $i$ -го элемента, приводящих к  $K$ -й (наихудшей) категории тяжести последствий, которое может возникнуть за наработку  $(T_{\text{раб.}})_i$ .

Для назначения приоритетов видам отказов, они распределяются по матрице критичности, на горизонтальной оси которой отложены значения КПТО, а на вертикальной – числа критичности видов отказов. Так как использование абсолютных значений чисел критичности неудобно (для высоконадежных элементов числа критичности весьма малы), рекомендуется использовать относительное число критичности вида отказа  $P_{ij}$ , которое рассчитывается по формуле

$$P_{ij} = \frac{Cm_{ij}^K}{\lambda_{\text{КИ}} \cdot T_{\text{миссии}}}. \quad (2)$$

На рис. 2 изображена матрица критичности, используемая для количественного анализа критичности видов отказов. На матрице выделены области равных приоритетов, назначаемые, как и в случае качественного анализа критичности, аналитиком, проводящим анализ для каждого изделия индивидуально.

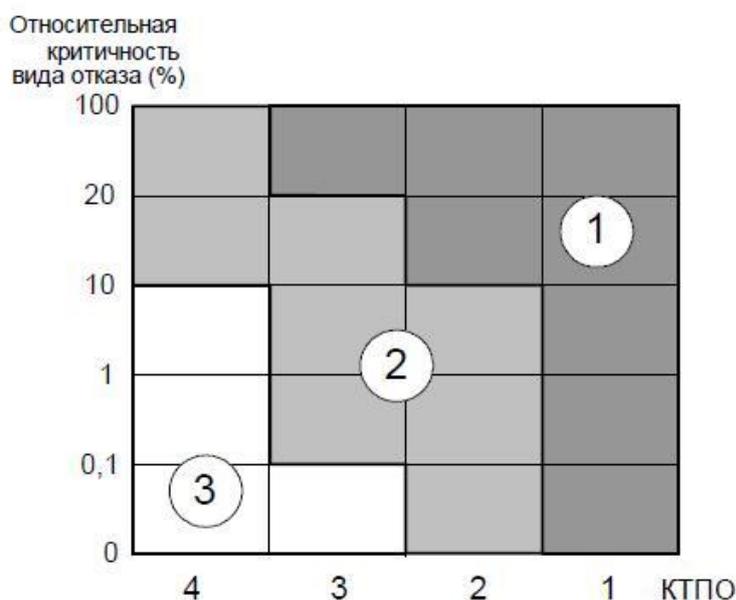


Рис. 2. Матрица критичности для количественного анализа

В зависимости от того, в какую область матрицы критичности попадает вид отказа, ему назначается соответствующий приоритет корректирующих и компенсирующих воздействий: 1-высокий; 2-средний; 3-низкий. Элементы, имеющие хотя бы один вид отказа 1-го приоритета, как правило, нуждаются в обязательном изменении конструкции с целью устранения критичного вида отказа или снижения тяжести его последствий (понижения приоритета). Элементы, чьи виды отказов получили 2-й приоритет, могут также потребовать доработки с целью повышения надежности или нуждаются в корректировке программы планово-профилактического обслуживания на этапе эксплуатации. Некоторые элементы 3-го приоритета также могут потребовать профилактического обслуживания на этапе эксплуатации.

Для упорядочения элементов по критичности необходимо рассчитать числа критичности элементов отдельно для каждой КТПО, т.е. для  $i$ -го элемента определяются четыре числа критичности:  $(Cr1)_i$ ;  $(Cr2)_i$ ;  $(Cr3)_i$ ;  $(Cr4)_i$ . Каждое число представляет собой сумму чисел критичности видов отказов этого элемента, относящихся к определенной КТПО:

$$\begin{aligned} (Cr1)_i &= \sum_{j=1}^{N_1} Cm_{ij}^1; & (Cr2)_i &= \sum_{j=1}^{N_2} Cm_{ij}^2; \\ (Cr3)_i &= \sum_{j=1}^{N_3} Cm_{ij}^3; & (Cr4)_i &= \sum_{j=1}^{N_4} Cm_{ij}^4, \end{aligned}$$

где  $Cm_{ij}^1, Cm_{ij}^2, Cm_{ij}^3, Cm_{ij}^4$  – числа критичности  $j$ -го вида отказа  $i$ -го элемента, относящегося к 1, 2, 3, 4 категориям тяжести последствий (рассчитываются по формуле (1));

$j$  – порядковый номер вида отказа элемента, относящегося к 1, 2, 3, 4 категории тяжести последствий;

$N_1, N_2, N_3, N_4$  – количество видов отказов  $i$ -го элемента, относящихся к 1, 2, 3, 4 категории тяжести последствий.

Если с элементом не связаны виды отказов с КТПО =  $K$ , то  $(CrK)_i = 0$  при  $K=1$  или 2, или 3, или 4. В расчетах вместо величин  $Cm_{ij}^K$  могут использоваться относительные значения, определяемые по формуле (2).

Упорядочение элементов по критичности осуществляется по трем параметрам: приоритету корректирующих и компенсирующих воздействий, КТПО и числу критичности элемента. Сначала выбирают все элементы, чьи виды отказа отнесены к 1-му приоритету и имеют КТПО = 1, и упорядочивают по убыванию числа критичности элемента. Затем выбирают элементы, чьи виды отказа имеют 1-й приоритет, но КТПО = 2, и также упорядочивают по убыванию числа критичности, и так далее – по убыванию приоритета и КТПО. Упорядоченный по критичности перечень элементов может использоваться для контроля факторов опасности, определения очередности внесения изменений в конструкцию с целью повышения надежности.

Таким образом, процесс формирования модели отказобезопасности воздушного судна представляет собой тщательный, всесторонний и полный анализ воздушного судна в части надежности и безопасности полета на различных уровнях: комплектующего изделия, функциональной системы и ВС в целом. Одним из ключевых терминов является функциональный отказ. Необходимо четко понимать причины и точно оценивать степень опасности различных отказов, что позволит построить адекватную модель и повысить уровень безопасности полетов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новожилов Г.В., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г. Безопасность полета самолета. Концепция и технология. М.: Машиностроение. 2003.
2. Кротов С.А. К вопросу о контроле отказобезопасности функциональных систем воздушных судов в процессе эксплуатации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 197. С. 79-84.
3. Кротов С.А. Концепция эксплуатационной модели отказобезопасности// Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 37-43.
4. Ливанов В.В., Новожилов Г.В., Неймарк М.С. Система управления безопасностью полета ОАО «ИЛ»// АвиаСоюз. 2013. № 44. С.14-21.
5. Руководство Р-4761. Руководство по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации// АР МАК, 2010.
6. Руководство по проведению анализа логистической поддержки изделий авиационной техники. Методические указания// Научно-исследовательский центр CALS-технологий «Прикладная логистика», 2010.

## APPROACH TO AIRCRAFT FAIL-SAFE MODEL FORMATION

Smirnov N.N., Krotov S.A.

The article discusses aircraft fail-safe model formation aspects, the key tasks of reliability control and flight safety are pointed out together with failure mode effects and criticality analysis.

**Keywords:** fail-safe, functional hazard assessment, criticality analysis.

## REFERENCES

1. **Novozhilov G.V., Neymark M.S., Tsesarskiy L.G.** *Bezopasnost' poleta samoleta. Kontseptsiya i tekhnologiya*. M.: Mashinostroenie. 2003. (In Russian).
2. **Krotov S.A.** К вопросу о контроле отказобезопасности функциональных систем воздушных судов в процессе эксплуатации. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2013. № 197. Pp. 79-84. (In Russian).
3. **Krotov S.A.** Kontseptsiya ekspluatatsionnoy modeli otkazobezopasnosti. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2014. №205. Pp. 37-43. (In Russian).
4. **Livanov V.V., Novozhilov G.V., Neymark M.S.** Sistema upravleniya bezopasnost'yu poleta OAO «IL». *AviaSojuz*. 2013. № 44. Pp.14-21. (In Russian).
5. **Rukovodstvo R-4761.** *Rukovodstvo po metodam otsenki bezopasnosti sistem i bortovogo oborudovaniya vozdushnykh sudov grazhdanskoj aviatsii*. AR MAK, 2010. (In Russian).
6. *Rukovodstvo po provedeniyu analiza logisticheskoy podderzhki izdeliy aviatsionnoy tekhniki*. Metodicheskie ukazaniya. Nauchno-issledovatel'skiy tsentr CALS-tekhnologiy «Prikladnaya logistika», 2010. (In Russian).

## Сведения об авторах

**Смирнов Николай Николаевич**, 1928 г.р., окончил КИИГА (1952), профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, автор более 300 научных работ, область научных интересов – техническая эксплуатация и поддержание летной годности воздушных судов.

**Кротов Станислав Александрович**, 1989 г.р., окончил МГТУ ГА (2011), аспирант МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – техническая эксплуатация воздушного транспорта, поддержание летной годности воздушных судов.