

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

А.А. Ицкович, И.А. Файнбург

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Часть 2

**Методы обеспечения надежности
при проектировании, производстве и эксплуатации**



Москва - 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Анализ надежности функциональных систем.....	4
1.1. Характеристика функциональных систем и видов резервирования.....	4
1.2. Анализ надежности функциональных систем методом структурных схем	13
1.3. Анализ надежности функциональных систем методом логических схем ...	17
1.4. Анализ надежности функциональных систем табличным методом...	19
2. Обеспечение надежности авиационной техники при проектировании и производстве.....	27
2.1. Нормирование требований к надежности	27
2.2. Требования к надежности по обеспечению безопасности полетов	36
2.3. Проектирование элементов конструкции на заданную надежность	42
2.4. Производственно-технологические методы обеспечения надежности	45
2.5. Принципы ускоренных испытаний на надежность	54
3. Контроль надежности авиационной техники в эксплуатации	58
3.1. Статистический контроль показателей надежности	58
3.2. Индивидуальный контроль норм надежности авиационной техники при эксплуатации	66
3.3. Оперативная оценка надежности серийных партий изделий	70
Вопросы для самоконтроля.....	74
Литература	76

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

**Кафедра технической эксплуатации летательных аппаратов
и авиационных двигателей**

А.А. Ицкович, И.А. Файнбург

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Часть 2

**Методы обеспечения надежности
при проектировании, производстве и эксплуатации**

Рекомендуется Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области эксплуатации авиационной и космической техники для межвузовского использования в качестве учебного пособия

Москва-2016

УДК 629.73.017.1
ББК 052-021.1
И 96

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Московского государственного технического университета ГА.

Рецензенты: д-р. техн. наук, проф. Зубков Б.В. (МГТУ ГА),
начальник отдела УПЛГ ВС Суслов С.И.

И 96 Ицкович А.А., Файнбург И.А.

Основы теории надежности. Ч. 2. Методы обеспечения надежности при проектировании, производстве и эксплуатации: учебное пособие – М.: МГТУ ГА, 2015. – 78 с., 24 рис., 12 табл.

ISBN 978-5-86311-995-3

Учебное пособие содержит материалы учебно-методического характера, необходимые для освоения знаний и умений основ теории надежности в соответствии с требованиями государственных и международных нормативных документов. Содержит характеристику методов обеспечения надежности при проектировании, производстве и эксплуатации, основы теории нормирования надежности, анализа надежности функциональных систем, проектирования изделий с заданным уровнем надежности, технологического обеспечения и контроля надежности по данным испытаний и эксплуатационных наблюдений.

Данное учебное пособие издается в соответствии с учебной программой учебной дисциплины «Основы теории надежности часть 2» по Учебному плану направления 162300 (25.03.01) бакалавриата и вместе с изданным ранее учебным пособием часть 1 обеспечивает изучение указанной дисциплины. Рекомендуется также слушателям системы послевузовской подготовки специалистов ГА.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 02.06.2015г. и методического совета 02.06.2015г.

ББК 052-021.1
Доп. св. тем. план 2016 г.
поз. 22

ИЦКОВИЧ Александр Абрамович, ФАЙНБУРГ Инна Александровна

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ. Ч. 2.
Учебное пособие

Подписано в печать 30.03.2016 г.

Печать офсетная
4,42 усл.печ.л.

Формат 60x84/16
Заказ № 30

5,5 уч.-изд. л.
Тираж 35 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20
Редакционно-издательские услуги ООО «Имидж-студия Арина»
127051 Москва, М. Сухаревская пл., д. 2/4 стр.1
ISBN 978-5-86311-995-3

© Московский государственный
технический университет ГА, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности авиационной техники (АТ) - приоритетная задача авиационной промышленности и гражданской авиации. От ее успешного решения зависят безопасность полетов и эффективность эксплуатации летательных аппаратов (ЛА). Важное место в практической деятельности по обеспечению надежности занимает система стандартов «Надежность в технике» (ГОСТ Р 27.001-2009. «Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения»).

В настоящем учебном пособии используется терминология по ГОСТ 27.002-89 . «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» и материалы ранее изданных авторами учебных пособий и пособий [1- 7] работы других авторов [8-10].

В соответствие с рабочей программой в результате освоения дисциплины «Основы теории надежности» студент, обучающийся по направлению 162300, *должен:*

знать:

- количественные характеристики надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий;
- законы распределения, методы статистической оценки надежности изделий в эксплуатации;
- методику построения моделей и расчета надежности, способы повышения надежности изделий;
- свойства летательного аппарата (ЛА) как объекта технической эксплуатации;

уметь:

- выполнять расчет характеристик надежности, определять точность и достоверность статистических оценок надежности,
- оценивать основные эксплуатационно-технические свойства ЛА;
- обосновывать требования и мероприятия по совершенствованию программ технической эксплуатации и повышению эффективности использования ЛА;

владеть:

- методами оценки влияния на безопасность полетов последствий отказов авиационной техники, ошибок авиационного персонала, воздействий неблагоприятных условий;
- способами сбора и обработки информации по надежности изделий авиационной техники (АТ);
- методиками расчета и статистической оценки характеристик надежности.

1. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

1.1. Характеристика функциональных систем и видов резервирования

Рассматривая *техническую систему* как упорядоченную совокупность взаимосвязанных элементов, отметим, что понятия система и элемент являются относительными. В зависимости от условий решаемой задачи один и тот же объект может именоваться системой, состоящей из элементов, либо элементом, входящим в более сложную систему. Ключевыми характеристиками технической системы являются ее назначение, способ (принцип) действия и структура. Назначение системы реализуется через целевые функции, обеспечивающие достижение желаемого результата ее функционирования. В качестве способов действия используются различные физические, химические, механические, биологические и другие явления. Взаимодействие составных частей системы таково, что, реализуя внутренний технический процесс, они тем самым создают требуемое внешнее воздействие. Так, используя зубчатую передачу, изменяют число оборотов и направление вращения. При этом создается причинно-следственная цепочка функций с превращением следствий (выходов) в причины (входа) следующих операций, характеризующая способ действия (функционирования) технической системы и образующая ее функциональную структуру.

Функциональный подход к анализу технических систем приводит к понятию *функциональной системы*, представляющей собой совокупность конструктивных элементов и агрегатов, предназначенных для выполнения определенных функций, связанных с полетом летательного аппарата (ЛА). Особенности функциональных систем ЛА являются их автономность, модульность конструкции, высокая степень резервирования, многообразие вариантов конструктивного исполнения.

Часто надежность системы называют структурной (схемной, функциональной) надежностью. Надежность системы зависит от надежности ее элементов и способов их соединения. Известно, что удобнее и проще спроектировать надежную систему из высоконадежных элементов. В этом случае можно ограничиться включением в схему минимально необходимого количества элементов. Однако создание предусмотренных конструктором высоконадежных элементов может быть сопряжено с такими техническими трудностями и такими затратами времени и материалов, что это окажется неприемлемым по срокам и стоимости. С другой стороны, применив рациональную схему, включающую резервные элементы, можно создать надежное изделие из менее надежных элементов.

Функциональная система является достаточно сложным объектом. Отказы или сочетания отказов ее элементов могут привести к одному из

функциональных отказов, заключающихся в невыполнении хотя бы одной целевой функции системы.

При анализе надежности системы при заданных условиях эксплуатации и наработке оценивается вероятности появления следующих событий: события A , заключающегося в безотказной работе объекта и противоположного события \bar{A} , выражающегося в появлении отказа.

Наиболее простыми соединениями в схеме расчета надежности систем являются последовательное и параллельное соединения элементов.

Последовательным называется такое соединение элементов в системе, при котором отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу системы.

Для последовательного соединения элементов {рис. 1.1а) полная группа событий определяется уравнением

$$P(A_1 A_2) + P(\bar{A}_1 + \bar{A}_2) = 1.$$

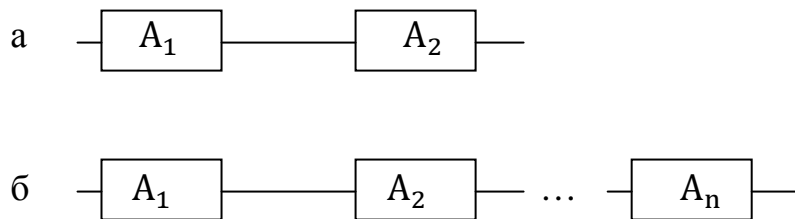


Рис. 1.1. Последовательное соединение элементов

Используя теорему умножения независимых событий, определим вероятность безотказной работы системы при последовательном соединении элементов

$$P_{\text{пос}} = P(A_1 A_2) = P(A_1)P(A_2) = P_1(t)P_2(t).$$

И по индукции для $i = \overline{1, N}$ элементов (рис.1.1б)

$$P_{\text{пос}}(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t). \quad (1.1)$$

По теореме о сложении вероятностей совместных событий вероятность отказа системы при последовательном соединении элементов (рис.1.1а) определяется по формуле

$$P(\bar{A}_1 + \bar{A}_2) = P(\bar{A}_1) + P(\bar{A}_2) - P(\bar{A}_1 \bar{A}_2),$$

$$Q_{\text{пос}}(t) = Q_1(t) + Q_2(t) - Q_1(t)Q_2(t),$$

где $Q(t)$ - вероятность отказа.

Вероятность отказа системы, состоящей из $i = \overline{1, N}$ последовательно соединенных элементов может быть с учетом (1.1) определена по формуле

$$Q_{\text{пос}}(t) = 1 - P_{\text{пос}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^N P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - Q_i(t)). \quad (1.2)$$

Подставляя в (1.1) и (1.2) вместо вероятности безотказной работы элементов $P_i(t) = \exp(-\int_0^t \lambda_i(t) dt)$, получим формулы показателей безотказности системы из последовательно соединенных элементов

$$P_{\text{пос}}(t) = \prod_{i=1}^N e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^N (\int_0^t \lambda_i(t) dt)}, \quad (1.3)$$

$$Q_{\text{пос}}(t) = 1 - e^{-\sum_{i=1}^N (\int_0^t \lambda_i(t) dt)}. \quad (1.4)$$

При экспоненциальном распределении наработки до отказа из (1.3) и (1.4) получим

$$P_{\text{пос}}(t) = e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t}, \quad (1.5)$$

$$Q_{\text{пос}}(t) = 1 - e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t}. \quad (1.6)$$

При $\sum_{i=1}^N \lambda_i t \ll 1$ можно использовать приближенную оценку из (1.5) и (1.6)

$$P_{\text{пос}}(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i t, \quad (1.7)$$

$$Q_{\text{пос}}(t) = 1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i t. \quad (1.8)$$

Параллельным называется соединение элементов в системе, при котором отказ системы наступает при отказе всех элементов.

Для параллельного соединения элементов (рис. 1.2а) полная группа событий выражается уравнением

$$P(A_1 A_2) + P(\bar{A}_1 + \bar{A}_2) = 1.$$

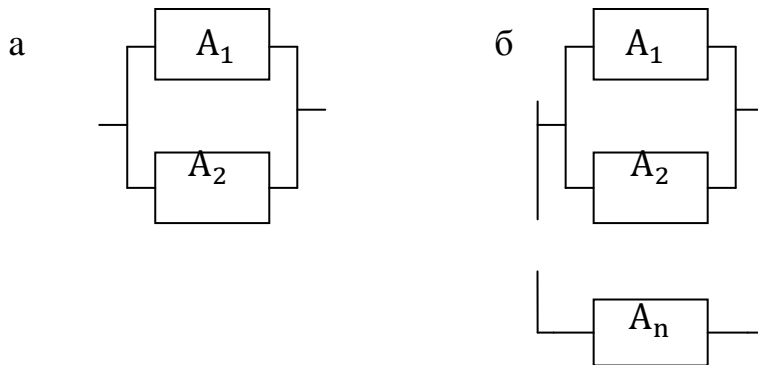


Рис. 1.2. Параллельное соединение элементов.

По формуле о сложении вероятностей совместных событий вероятность безотказной работы системы при параллельном соединении элементов (рис.1.2а)

$$P_{\text{пар}}(t) = P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 A_2).$$

По формуле умножения вероятностей независимых событий вероятность отказа системы из параллельно соединенных элементов (рис. 1.2а)

$$Q_{\text{пар}}(t) = P(\bar{A}_1 \bar{A}_2) = P(\bar{A}_1)P(\bar{A}_2) = Q_1(t)Q_2(t)$$

и по индукции для $j = \overline{1, K}$ получим (рис. 1.2б)

$$Q_{\text{пар}}(t) = \prod_{j=1}^K Q_j. \quad (1.9)$$

После замены $Q(t) = 1 - P(t)$ в (1.6) получим

$$1 - Q_{\text{пар}}(t) = \prod_{j=1}^K (1 - P_j(t)).$$

Откуда получим формулу для вероятности безотказной работы системы из параллельно соединенных элементов

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - \prod_{j=1}^K (1 - P_j(t)). \quad (1.10)$$

Подставив в (1.9) и (1.10) вместо вероятности безотказной работы и вероятности отказа элементов $P_i(t) = \exp(-\int_0^t \lambda(t)dt)$, и $Q_i(t) = 1 - P_i(t)$, получим для системы из параллельно соединенных элементов

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - e^{-\int_0^t \lambda_j(t)dt}), \quad (1.11)$$

$$Q_{\text{пар}}(t) = \prod_{j=1}^N (1 - e^{-\int_0^t \lambda_j(t)dt}). \quad (1.12)$$

При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа из (1.11) и (1.12) получим

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - e^{-\int_0^t \lambda_{ij}t}), \quad (1.13)$$

$$Q_{\text{пар}}(t) = \prod_{j=1}^N (1 - e^{-\int_0^t \lambda_{ij}t}). \quad (1.14)$$

Зависимость вероятности безотказной работы системы $P_{\text{сист}}$ от вероятностей безотказной работы элементов $P_{\text{эл}}$ при последовательном и параллельном соединении элементов приведены на рис.1.3.

Как показано на рис. 1.3, при параллельном соединении элементов повышается безотказность системы. При параллельном соединении сохраняется работоспособность системы при отказе отдельных элементов. Эта возможность реализуется при резервировании.

Резервированием называется применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов.

Термины и определения основных понятий в области резервирования установлены системой стандартов "Надежность в технике". При резервировании различают понятия: основной, резервный и резервируемый элементы. *Основным элементом* является элемент структуры объекта, необходимый для выполнения объектом требуемых функций при отсутствии отказов его элементов. *Резервным элементом* называется элемент объекта, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего. *Резервируемым элементом* считается основной элемент, на случай отказа которого в объекте предусмотрен резервный элемент. Совокупность дополнительных средств и/или (возможностей), используемых для резервирования, образует *резерв*

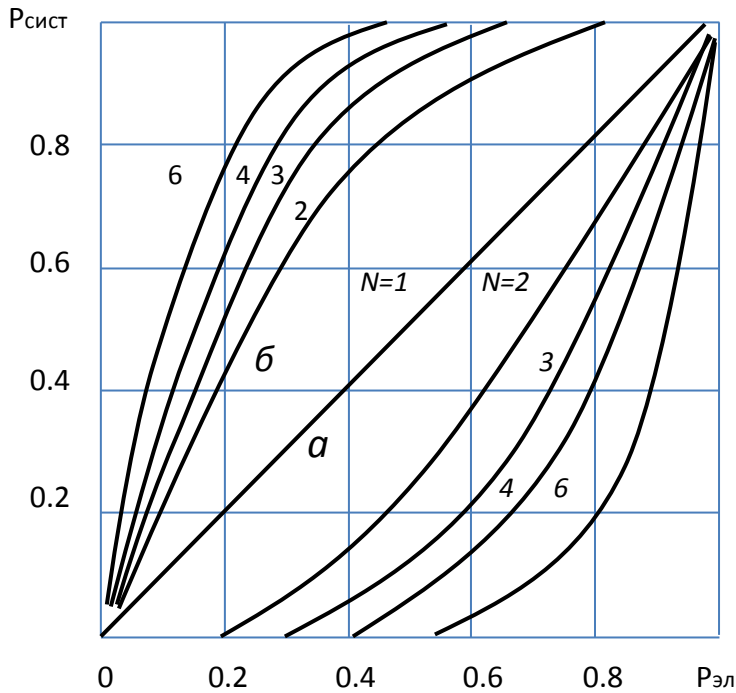


Рис. 1.3. Зависимость вероятности безотказной работы системы $P_{\text{сист}}$ от вероятности безотказной работы элементов $P_{\text{эл}}$ и числа элементов N при последовательном (а) и параллельном (б) соединении.

Классификация основных видов резервирования объектов позволяет сгруппировать их по наиболее существенным признакам (табл. I.I). В зависимости от содержания резерва определяются виды резервирования. *Структурное резервирование* основано на применении резервных элементов структуры объекта, *временное резервирование* - на применении резервов времени, *информационное резервирование* - резервов информации, *функциональное резервирование* - функциональных резервов, *нагрузочное резервирование* - нагрузочных резервов.

В зависимости от режима нагружения определяются виды резерва. Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного, называется *нагруженным резервом*; находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной - *облегченным резервом* и находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного - *ненагруженным резервом*.

По признаку восстановления работоспособности резерва рассматриваются восстанавливаемый и невосстанавливаемый резервы. Резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, работоспособность которых в случае отказа подлежит восстановлению при эксплуатации,

называется *восстанавливаемым резервом*, а если не подлежит восстановлению при эксплуатации - *невосстанавливаемым резервом*.

Таблица 1.1

Классификация основных видов резервирования объектов

Признак классификации	Виды резервирования
Содержание резерва	Структурное резервирование Временное резервированное Информационное резервирование Функциональное резервирование Нагруженное резервирование
Режим нагруженности резерва	Нагруженный резерв Облегченный резерв Ненагруженный резерв
Наличие восстановления работоспособности	Восстанавливаемый резерв Невосстанавливаемый резерв
Уровень резервных элементов	Общее резервирование Раздельное резервирование Смешанное резервирование
Способ включения резервного элемента	Постоянное резервирование Динамическое резервирование Резервирование замещением Скользящее резервирование
Кратность резервирования	Дублирование 2- кратное 3- кратное и др.

По уровню резервируемых элементов (объектов) структурного резервирования различают: общее, раздельное и смешанное резервирование.

Общее резервирование - резервирование, при котором резервируемым элементом является объект в целом. Структурная схема надежности системы при общем резервировании приведена на рис. 1.4, содержащая N - число последовательно соединенных элементов, K - число параллельно соединенных звеньев.

При отказе любого элемента основного звена функции выполняют резервными элементами. Вероятность безотказной работы системы при общем резервировании с учетом (1.1) и (1.10) определяется по формуле

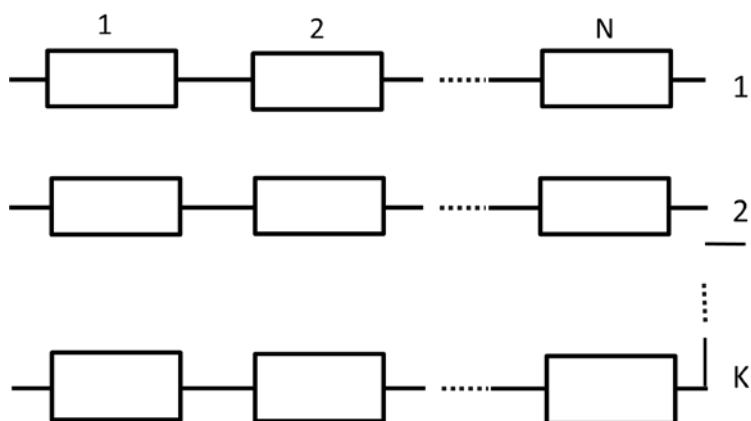


Рис. 1.4. Структурная схема надежности системы при общем резервировании

$$P_{p0}(t) = 1 - \prod_{j=1}^K (1 - \prod_{i=1}^N P_i(t))_j, \quad (1.15)$$

при равнонадежных элементах из (1.15) получим

$$P_{p0}(t) = 1 - (1 - P_i^N(t))^K. \quad (1.16)$$

Раздельное резервирование - резервирование, при котором резервируемыми являются отдельные элементы объекта или их группы.

Структурная схема надежности системы при раздельном резервировании приведена на рис. 1.5, где K - число элементов в группе, N - число групп.

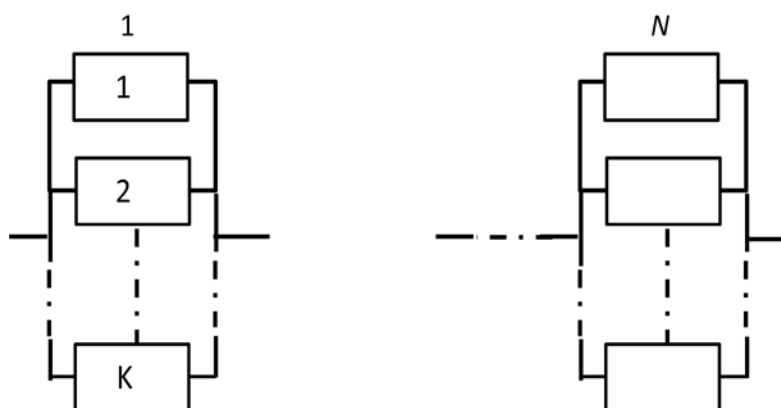


Рис. 1.5. Структурная схема надежности системы при раздельном резервировании

При отказе любого основного элемента объекта его функции выполняют резервные элементы данной группы. Вероятность безотказной работы системы при раздельном резервировании с учетом (1.1) и (1.10) определяется по формуле

$$P_{pp}(t) = \prod_{i=1}^N (1 - \prod_{j=1}^K (1 - P_j(t)))_i, \quad (1.17)$$

для равно надежных элементов из (1.17) получим

$$P_{pp}(t) = 1 - (1 - P_j(t))^K)^N. \quad (1.18)$$

Для сравнительной оценки общего и отдельного резервирования разложим в ряд выражения (1.16) и (1.18), ограничившись первыми членами разложения

$$Q_{PO} = 1 - P_{PO} = N^K q^K, \quad (1.19)$$

$$Q_{PP} = 1 - P_{PP} = Nq^K, \quad (1.20)$$

где q вероятность отказа равно надежных элементов ($q = 1 - p$)
Полученное из (1.19) и (1.20) отношение

$$\frac{Q_{PO}}{Q_{PP}} = N^{K-1},$$

так как $N^{K-1} > 1$, $Q_{PO} > Q_{PP}$, а $P_{PP} > P_{PO}$, то т.е. отдельное резервирование при одинаковом количестве элементов более выгодно с точки зрения безотказности. Однако при отдельном резервировании усложняется проверка работоспособности системы при ее техническом обслуживании.

Сметанное резервирование - сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте. Применяется в системах, отказы которых непосредственно влияют на безопасность полета.

По способу включения резервного элемента системы при возникновении отказа основного элемента различают постоянное и динамическое резервирование, резервирование замещением и скользящее резервирование.

Постоянное резервирование - это резервирование без перестройки структуры объекта при возникновении отказа его элемента. Постоянное резервирование в простейшем случае представляет собой параллельное соединение элементов без переключающих устройств. К постоянному резервированию относятся структурные схемы, приведенные на рис. 1.4, 1.5. Достоинством постоянного резервирования является постоянная готовность резервного элемента к применению, поэтому оно используется в ответственных системах, отказы которых влияют на безопасность полета, например, в системах управления. К недостаткам постоянного резервирования относится то, что при нем происходит изнашивание и старение резервных элементов такое же, как основного.

Динамическое резервирование представляет собой резервирование с перестройкой структуры объекта при возникновении отказа его элемента. Динамическое резервирование имеет место при наличии переключающих устройств, реагирующих на отказы элементов объекта. Динамическое резервирование часто представляет собой резервирование замещением отказавшего элемента резервным. Динамическое резервирование может быть и более сложным, если отказ одного элемента приводит не к его заведению таким же резервным элементом, а к более сложному изменению структуры объекта, например, схемы прохождения в нем информации.

Резервирование замещением - это динамическое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента. Структурная схема надежности системы при

резервировании замещением приведена на рис. 1.6. Вероятность безотказной работы системы при резервировании замещением определяется по формуле

$$P_{PЗ}(t) = 1 - (1 - P_0)(1 - P_P P_{\Pi}),$$

где P_0, P_P, P_{Π} – вероятности безотказной работы основного, резервного элементов и переключателя, соответственно.

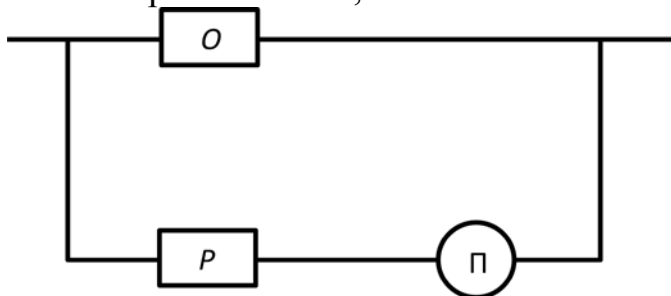


Рис. 1.6. Структурная схема надежности системы при резервировании замещением: O - основной элемент, P - резервный элемент, Π - переключатель

Скользящее резервирование - это резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе.

Кратностью резерва называется отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых ими основных элементов объекта, выраженное несокращаемой дробью. При этом кратность резерва при дублировании составит один к одному, при двукратном резерве - два к одному, при трехкратном резерве - три к одному.

Определим кратность резервирования ($K - 1$) к одному на примере структурной схемы надежности систем при резервировании замещением (рис. 1.7). Заданы вероятности безотказной работы: системы $P_1(t) = P_{\text{год}} = 0,9998$, основного и резервного элементов $P_3(t) = 0,95$, переключателя $P_n(t) = 0,98$.

Вероятность безотказной работы такой системы при заданном уровне безотказности определяется по формуле

$$P_{\text{зад}} = 1 - (1 - P_3(t))(1 - P_3(t)P_n(t))^{K-1},$$

или

$$1 - (1 - P_3(t))(1 - P_3(t)P_n(t))^{K-1} = 1 - P_{\text{зад}}.$$

Отсюда найдем кратность резервирования

$$K - 1 = \frac{\lg(1 - P_{\text{зад}}) - \lg(1 - P_3(t))}{\lg(1 - P_3(t)P_n(t))}.$$

Кратность резервирования

$$K - 1 = \frac{\lg(1 - 0,9998) - \lg(1 - 0,95)}{\lg(1 - 0,95 \cdot 0,98)} = 3,3.$$

Следовательно, округляя в большую сторону, получим кратность резервирования четыре к одному, обеспечивающую вероятность безотказной работы $P_C(t) \geq P_{\text{зад}} = 0,9998$, в то время как безотказность каждого элемента

недостаточна.

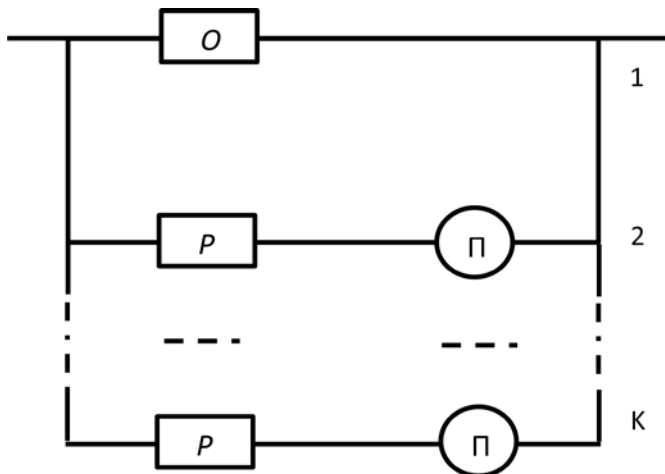


Рис. 1.7. Структурная схема надежности системы при резервировании замещением: O - основной элемент, P - резервный элемент, П – переключатель

1.2. Анализ надежности функциональных систем методом структурных схем

Метод структурных схем предусматривает построение расчетной схемы анализа надежности функциональной системы из звеньев последовательно и параллельно соединенных элементов, выполняющих определенные функции, и обеспечивает возможность оценки показателей надежности системы по данным о надежности ее элементов.

К элементам системы предъявляются следующие требования:

- 1) каждый элемент должен выполнять определенные функции, обеспечивая формирование выходного параметра при условии поступления к нему входного параметра;
- 2) элементы системы должны быть взаимосвязаны при выполнении каждым элементом заданных функций;
- 3) известны показатели надежности элементов, полученные по результатам испытаний или эксплуатационных наблюдений.

Возможность использования метода структурных схем определяется следующими условиями:

все элементы системы должна быть одноотказовыми, т.е. каждый элемент может иметь отказ только одного вида;

события, представленные в виде звеньев, последовательно и параллельно соединенных элементов должны быть независимыми;

в структурной схеме не должно быть событий, являющихся отрицанием других событий;

должна соблюдаться ординарность звеньев, т.е. одно и то же событие должно представляться в виде одного звена.

Анализ надежности функциональной системы методом структурных схем выполняется в следующем порядке:

описание принципов построения и функционирования системы на основе рассмотрения ее принципиальной схемы;

определение условия безотказной работы системы;

построение структурной схемы расчета показателей надежности системы, состоящей из последовательно и параллельно соединенных элементов. При этом совокупность элементов, необходимым и достаточным условием работоспособности которых является отказ хотя бы одного элемента, образует последовательное соединение. Совокупность же элементов, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех элементов, составляет параллельное соединение;

составление выражений для расчета вероятности безотказной работы системы и ее звеньев (блоков), состоящих из последовательно и параллельно соединенных элементов;

подготовка исходных данных по безотказности элементов системы;

расчет вероятности безотказной работы системы по данным о безотказности ее элементов.

Вид соединения элементов в структурной схеме не всегда совпадает с видом их соединения в принципиальной (монтажной схеме) и зависит от влияния отказов элементов на работоспособность функциональной системы, т.е. определяется видом и характером отказов элементов. Это может быть проиллюстрировано на примере соединения топливных фильтров (табл. 1.2). Работоспособность системы, состоящей из двух фильтров, имеющих последовательное и параллельное соединения, рассматривается при двух видах отказов: разрыв сетки фильтроэлемента или ее загорание.

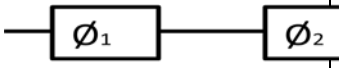
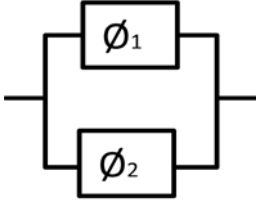
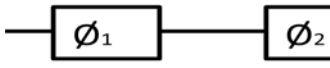
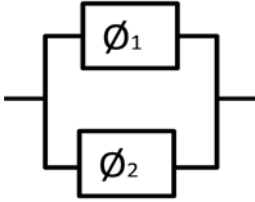
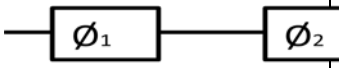
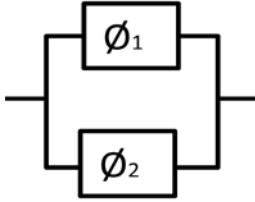
При последовательной установке фильтров работоспособность системы нарушается при разрыве сеток обоих фильтров или загорании сетки только одного фильтра. При разрыве сетки одного фильтра очистка топлива осуществляется другим, исправным фильтром, поэтому в структурной схеме используется параллельное соединение, что не совпадает с соединением в принципиальной схеме. При загорании одного фильтра система становится неработоспособной, и поэтому в структурной схеме используется последовательное соединение, также как и в принципиальной схеме.

При параллельной установке фильтров разрыв сетки одного фильтра приводит к нарушению работоспособности системы, поэтому в структурной схеме принимается последовательное соединение. В случае загорания сетки вида соединений в принципиальной и структурной схемах совпадают (параллельное соединение).

Разработка и составление правильной структурной схемы требует четкого определения понятия отказа элемента и влияния этого отказа на работоспособность системы.

Таблица 1.2

Принципиальная и структурная схемы соединения элементов

Принципиальная (монтажная) схема	Опасен разрыв сетки	Опасно загорание сетки
		
		

Анализ надежности функциональной системы методом структурных схем рассмотрим на примере топливной системы, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.8. Вероятности безотказной работы элементов известны. Требуется определить вероятность безотказной работы топливной системы.

Принципы построения и функционирования топливной системы:

топливо подается в авиадвигатель АД из связанных баков В1 и В2 как подкачивающим насосом НП1 через обратный клапан ОК1, так и насосом- НП2 через клапан ОК1 или из отдельного бака В3 насосом НП3 через клапан ОК1. Далее из всех баков топливо подается через насос двигательный НД, топливо-масляный радиатор ТМР и фильтр Ф. При такой схеме отказ одного из баков, насосов и обратных клапанов не приводит к отказу системы, так как имеются резервные звенья. *Условия безотказности топливной системы*, исходя из требований безопасности полета, заключаются в обеспечении потребного расхода топлива до полной выработки его из баков на всех режимах работы двигателя в полете. При таком определении условий безотказности за наработку системы принимается время полета, в течение которого топливо полностью вырабатывается из баков.

Построение структурной схемы расчета надежности системы производится в предположении, что каждый элемент может быть подвержен только одному виду отказа и может находиться в одном из двух состояний: работоспособном (событие безотказности) и неработоспособном (событие - отказ). При построении структурной схемы учитывается, что часть элементов подвержена резервируемым отказам. К таким элементам относятся баки, насосы подкачки и обратные клапаны. Учитывая взаимосвязь баков В1 и В2, звено структурной схемы, обозначающее событие безотказной работы насоса подкачки и обратного клапана первого бака, соединяется параллельно со звеном событий безотказной работы насоса подкачки и обратного клапана второго бака.

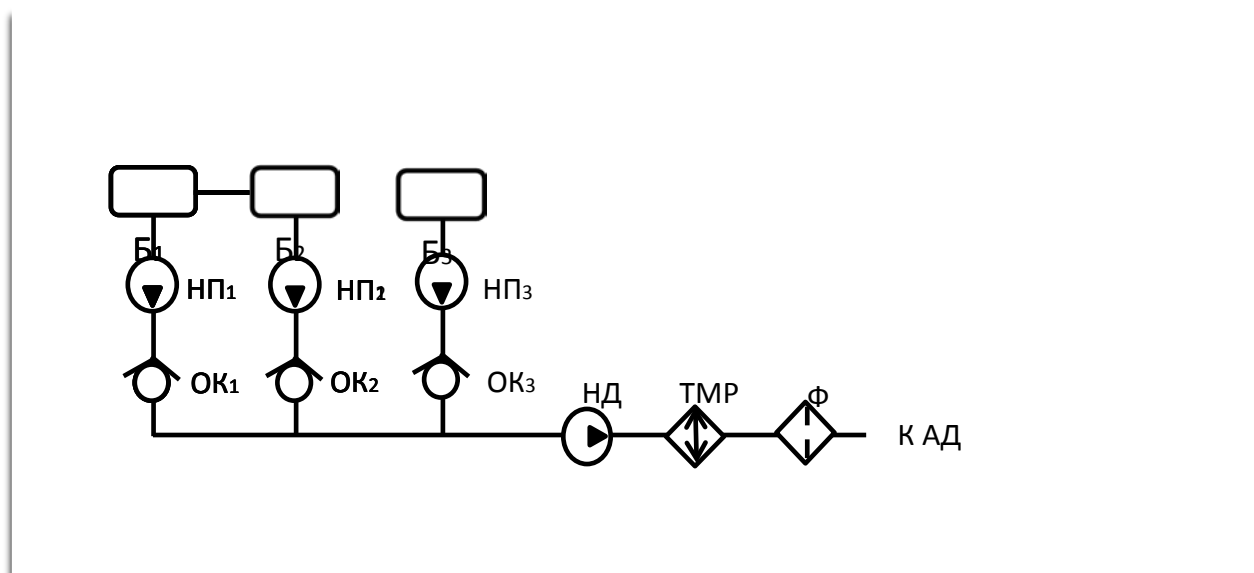


Рис. 1.8. Принципиальная схема топливной системы

В свою очередь, звено событий безотказной работы первых двух баков, их насосов подкачки и обратных клапанов соединяется параллельно со звеном событий безотказности третьего бака и его насоса подкачки и обратного клапана (рис. 1.9).

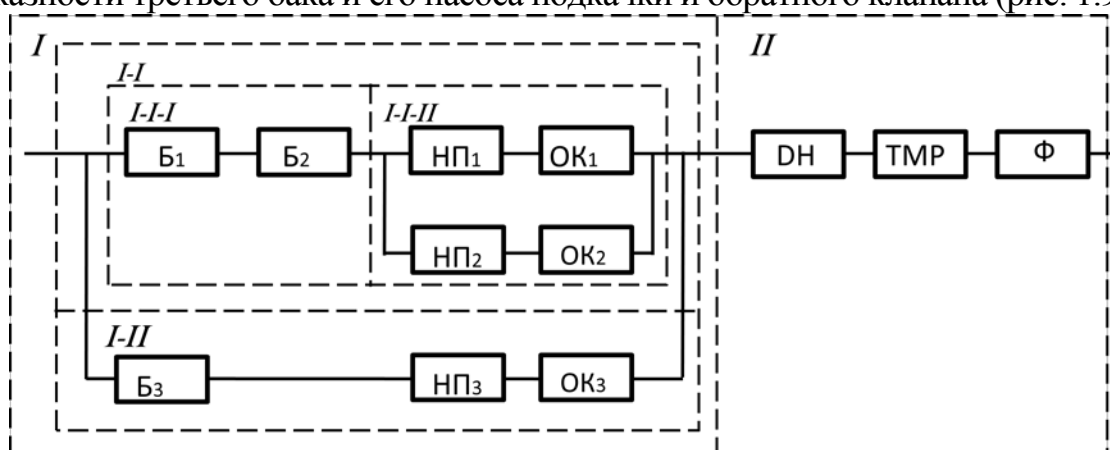


Рис. 1.9. Структурная схема надежности топливной систем

Структурная схема надежности топливной системы представлена в виде блоков (подблоков), соединенных последовательно (параллельно), и приведена на рис. 1.10.

Составление выражения для расчета вероятности безотказной работы топливной системы выполняется сначала на уровне блоков, а затем на уровне элементов.

На уровне блоков (рис. 1.10) получим:

$$P_{\text{сист}} = P_I P_{II} = (1 - (1 - P_{I-I-I} \cdot P_{I-I-II})(1 - P_{I-II})) P_{II},$$

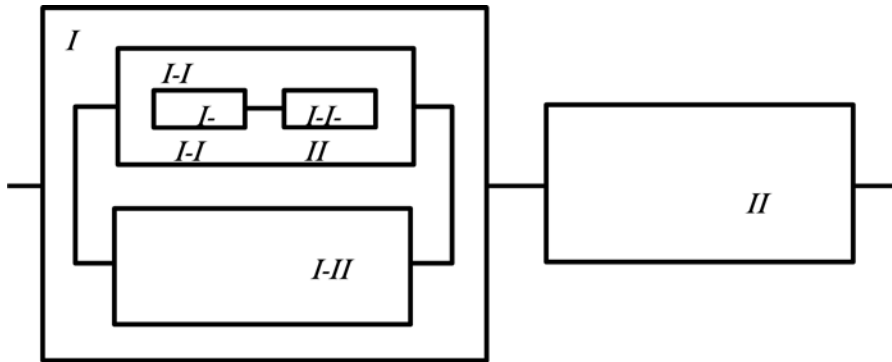


Рис. 1.10. Выделение блоков в структурной схеме надежности топливной системы

$$P_I = 1 - (1 - P_{I-I})(1 - P_{I-II}),$$

$$P_{I-I} = P_{I-I-I} \cdot P_{I-I-II}.$$

На уровне элементов (рис.1.9) получим:

$$P_{I-I-I} = P_{B1} \cdot P_{B2},$$

$$P_{I-I-II} = 1 - (1 - P_{НП1} \cdot P_{ОК1})(1 - P_{НП2} \cdot P_{ОК2}),$$

$$P_{I-II} = P_{B3} \cdot P_{НП3} \cdot P_{ОК3},$$

$$P_{II} = P_{ИИ} \cdot P_{ТМР} \cdot P_{Ф}.$$

Для топливной системы в целом выражение для расчета вероятности безотказной работы топливной системы имеет вид:

$$P_{\text{сист}} = (1 - (1 - P_{B1} P_{B2} (1 - (1 - P_{НП1} \cdot P_{ОК1}) (1 - P_{НП2} \cdot P_{ОК2}))) \times$$

$$x(1 - P_{B3} \cdot P_{НП3} \cdot P_{ОК3})) P_{ИИ} \cdot P_{ТМР} \cdot P_{Ф}.$$

Для сравнительной оценки вероятность безотказной работы определяется за I ч наработки. Важной характеристикой безотказности системы является также вероятность безотказной работы за среднее время беспосадочного полета ЛА.

1.3. Анализ надежности функциональных систем методом логических схем

При анализе надежности сложных многофункциональных систем, элементы которых могут иметь несколько видов зависимых отказов, не соблюдаются необходимые условия для применения метода структурных схем (п. 1.2). В этих случаях может использоваться метод логических схем.

В логической схеме в отличие от структурной допускается наличие звеньев с зависимыми событиями и повторение звеньев одинакового содержания.

Метод логических схем использует операции логического сложения и умножения.

Логическое сложение $A_1 + A_2$ читается как « A_1 или A_2 ». Эта функция выражает событие, которое достоверно в том и только в том случае, если по крайней мере одно из двух событий A_1 и A_2 является достоверным. Для логического

сложения справедливо $A + A = A$.

Логическое умножение A_1A_2 читается « A_1 и A_2 ». Эта функция выражает событие, которое достоверно в том и только в том случае, когда события достоверны. Для логического умножения справедливо $AA = A$.

Событие \bar{A} является дополнением или отрицанием события A и поэтому $A + \bar{A} = 1$, $A\bar{A} = 0$.

Элементарные логические операции обладают следующими свойствами:

ассоциативности $(A_1A_2)A_3 = A_1(A_2A_3)$;

коммутативности $A_1A_2 = A_2A_1$;

дистрибутивности $(A + B)C = AC + AB$.

Эти свойства называются законами идемпотентности.

Анализ надежности функциональных систем методом логических схем выполняется в следующем порядке:

определяется условие безотказности система в зависимости от сочетания возможных отказов элементов или звеньев;

строится логическая схема условий безотказности системы с цепочкой логических связей работоспособности системы и допустимых отказов отдельных элементов;

составляется алгебраическое уравнение событий безотказности системы и расчетное уравнение ее вероятности безотказной работы с использованием операций алгебры логики;

подготавливаются исходные данные о безотказности элементов системы;

определяются вероятности безотказной работы системы по данным о безотказности элементов системы.

Анализ надежности системы методом логических схем рассмотрим на примере системы, состоящей из двух параллельно соединенных фильтров и двух последовательно соединенных с ними агрегатов (рис. 1.11). Требуется определить вероятность безотказной работы системы.

Каждый из фильтров (Φ_1 и Φ_2) может иметь по два вида отказа: по засорению сетки с вероятностью отказа q'_Φ и по разрыву сетки с вероятностью отказа q''_Φ поэтому расчет надежности следует проводить методом логических схем.

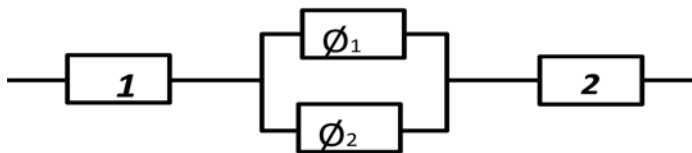


Рис. 1.11. Принципиальная схема системы

Условие безотказности системы формулируется следующим образом. Система будет работать безотказно, если:
все элементы работают безотказно;

произойдет отказ по загоранию одного фильтра при условии безотказной работы остальных элементов;

произойдет отказ по загоранию второго фильтра при условии безотказной работы остальных агрегатов.

Отказ фильтра по разрыву сетки является недопустимым, так как при этом не будет обеспечиваться очистка рабочей жидкости от механических примесей.

Логическая схема надежности системы представлена на рис. 1.12.

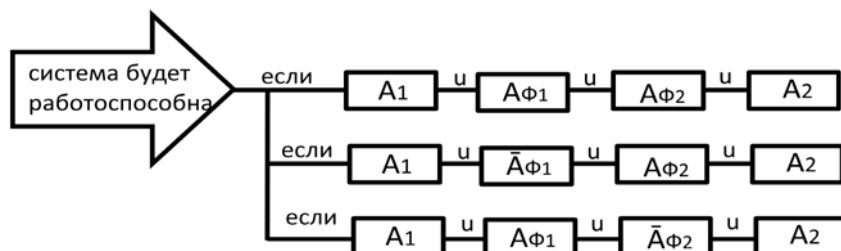


Рис. 1.12. Логическая схема надежности системы

Составим алгебраическое уравнение событий и расчетное уравнение вероятности безотказной работы системы

$$S = A_1 A_{\Phi 1} A_{\Phi 2} A_2 + A_1 \bar{A}_{\Phi 1} A_{\Phi 2} A_2 + A_1 A_{\Phi 1} \bar{A}_{\Phi 2} A_2,$$

$$P_{\text{сист}} = P_1 P_{\Phi 1} P_{\Phi 2} P_2 + P_1 q'_{\Phi 1} P_{\Phi 2} P_2 + P_1 P_{\Phi 1} q'_{\Phi 2} P_2 = P_1 P_2 (P_{\Phi 1} P_{\Phi 2} + q'_{\Phi 1} P_{\Phi 2} + P_{\Phi 1} q'_{\Phi 2}).$$

Учитывая наличие двух видов отказа фильтров, определим вероятность его безотказной работы

$$P_{\Phi} = 1 - q_{\Phi} = 1 - (q'_{\Phi} + q''_{\Phi}) = 1 - q'_{\Phi} - q''_{\Phi}.$$

Принимая $q = q_1 = q_2$ и переходя к вероятностям отказа элементов, получим

$$P_{\text{сист}} = (1 - q)^2 (1 - q'_{\Phi 1} - q''_{\Phi 1}) (1 - q'_{\Phi 2} - q''_{\Phi 2}) + q'_{\Phi 1} (1 - q'_{\Phi 2} - q''_{\Phi 2}) + (1 - q'_{\Phi 1} - q''_{\Phi 1}) q'_{\Phi 2}.$$

При условии $q'_{\Phi 1} = q'_{\Phi 2}$; $q''_{\Phi 1} = q''_{\Phi 2}$ определим

$$P_{\text{сист}} = (1 - q)^2 (1 - q'_{\Phi} - q''_{\Phi}) (1 - q'_{\Phi} - q''_{\Phi} + 2q'_{\Phi}).$$

1.4. Анализ надежности функциональных систем табличным методом

Анализ надежности функциональных систем ЛА табличным методом выполняется в следующем порядке:

составление описания системы;

подготовка исходных данных;

определение возможных видов и причин отказов в системе;

вычисление вероятностей возникновения видов отказов системы и ранжирование причин отказов в порядке усложнения вероятностей их возникновения;

анализ характеристик безотказности.

Под видом отказа системы понимается событие, которое заключается в переходе системы в неработоспособное состояние определенного вида, характеризующее конкретным нарушением требований нормативной документации. При этом рассматриваются полностью и частично неработоспособные состояния.

Критерий вида отказа системы устанавливается как возможное нарушение заданных требований к одной или нескольким функциональным характеристикам с учетом степени или диапазона.

Описание системы содержит сведения о:

назначении, заданных функциях, функциональных связях с другими системами;

входных и выходных характеристиках функционирования и их возможных нарушениях;

структуре, принципах построения и особенностях функционирования, средствах контроля, объемах и периодичности контроля и восстановления исправности системы;

перечне элементов, входящих в состав системы, включая средства бортового контроля.

К исходным данным, используемым для определения видов отказов, относятся:

возможные виды нарушений отдельных характеристик ее функционирования, которые устанавливаются предварительно на основе анализа физической сущности характеристик и обобщения опыта эксплуатации аналогичных систем, а затем уточняются с использованием результатов моделирования стендовых и летных испытаний;

условия эксплуатации, характеризующиеся продолжительностью типового полета и отдельных его этапов, режимами и условиями работы системы и ее элементов, полнотой и периодичностью работ по контролю состояния элементов и восстановлению их работоспособности при техническом обслуживании.

Определение видов и причин отказов производится табличным методом и методом логических схем.

Табличный метод позволяет учесть виды, последовательность возникновения и зависимость отказов элементов. При использовании этого метода обеспечивается полнота выявления видов и причин отказов системы, что является существенным для анализа систем с большим числом выходных характеристик и сложной структурой, для которых предварительно могут быть определены только виды нарушения выходных характеристик.

Табличный метод заключается в составлении таблиц несовместных состояний системы и анализа совокупности выходных характеристик системы при этих состояниях.

Таблица несовместных состояний составляется путем систематизированного перебора отказов элементов: по одному, по два, ..., по r' . При этой состояниях H_z системы различаются видами и последовательностью отказов элементов Z . Максимальное число отказавших элементов в рассматриваемых состояниях системы выбирается из условия, что при переборе состояний с числом отказавших элементов не более r' выявятся все вида отказов системы или при переборе состояний с $r + 1$ отказавшими элементами могут выявиться только такие виды отказов, вероятности возникновения которых будут менее заранее установленного числа q_0 .

Для каждого из рассматриваемых несовместных состояний системы H_z путем анализа определяются значения ее выходных характеристик Y при определенных значениях входных характеристик системы X и заносятся в таблицу. При этом одно и то же значение выходных характеристик может быть установлено для различных состояний системы и входных характеристик.

В результате анализа выявляются возможные сочетания значений выходных характеристик, которые используются для формирования видов отказов R системы, а также определяются соответствующие совокупности отказавших элементов с учетом видов их отказов и последовательности их возникновения Z и состояния входных характеристик, которые используются для составления перечня причин отказов системы.

При составлении таблицы несовместных состояний (табл. 1.3) применяются следующие обозначения:

\bar{A}_i - отказ, имеющий i -й порядковый номер ($i=1,2,\dots,N$);

H_0 - состояние системы с полностью исправными элементами;

$H_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma}$ - состояние, в которое переходит система после возникновения отказов с порядковыми номерами $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma$ происшедших в указанной последовательности во времени;

Z - совокупность отказов элементов $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma$;

r - порядок состояния системы, равный количеству элементов, приведших систему в рассматриваемое состояние;

$Y_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma}$ - состояние совокупности выходных характеристик системы, определяемое видами нарушений a, b, c, \dots, f, q характеристик системы;

μ - совокупность видов нарушений выходных характеристик a, b, c, \dots, f, q .

Выходными величинами таблицы несовместных состояний системы являются \bar{A}_i и H_z . В головке таблицы устанавливаются все возможные вида отказов элементов системы \bar{A}_i . В заголовке строк заносятся состояния системы, при которых она остается полностью работоспособной или частично в зависимости от количества и видов нарушений выходных характеристик. В каждую

строку таблиц записывается результат анализа значений выходных характеристик системы при состоянии системы $H_{Z_i}H_Z$, в которое переходит система из состояния H_Z при возникновении отказа с порядковым номером i .

Таблица 1.3

Таблица несовместных состояний систем

Работоспособное (полностью или частично) состояние системы	\bar{A}_1	\bar{A}_2	\bar{A}_3	...	\bar{A}_i	...	\bar{A}_{N-1}	\bar{A}_N	Неработоспособное (полностью или частично) состояние системы
Состояние нулевого порядка H_0	1	2	3	...	I	...	N-1	N	N+1
Состояние первого порядка: H_1	Y_0	Y_0	Y_0	...	Y_b	...	Y_c	Y_c	$H_1(Y_0), \dots, H_i(Y_b), \dots, H_{N-1}(Y_c)$
...	-	Y_a	Y_a	...	$Y_{a,b}$	Y_0	$Y_{a,c}$	Y_0	$H_{1,2}(Y_a), \dots, H_{1,3}(Y_a), \dots, H_{1,2}(Y_{a,b}), \dots, H_{1,N-1}(Y_{a,c})$
H_{N-1}	$Y_{a,c}$	$Y_{a,c}$	$Y_{a,c}$	...	$Y_{a,b,c}$	...	-	Y_c	$H_{N-1,1}(Y_{a,c}), H_{N-1,2}(Y_{a,c}), H_{N-1,3}(Y_{a,c}), \dots, H_{N-1,i}(Y_{a,b,c}), \dots, H_{N-1,N}(Y_c)$
Состояние второго порядка: $H_{1,2}$	-	-	$Y_{a,c}$	...	$Y_{a,b,c}$	...	Y_c	Y_c	$H_{1,2,3}(Y_{a,c}), \dots, H_{1,2,1}(Y_{a,b,c}), \dots, H_{1,2,N-1}(Y_c), H_{1,2,N-1}(Y_c)$
...	$H_{N,1}$	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_{N,1}$	-	$Y_{b,c}$	$Y_{a,b,c}$	...	$Y_{a,b,c}$	...	$Y_{a,c}$	-	$H_{N,1,2}(Y_{b,c}), H_{N,1,3}(Y_{a,b,c}), \dots, H_{N,1,N-1,N}(Y_{a,c})$
Состояние γ -го порядка $H_{1,2,N-1}$	-	-	$Y_{a,c}$	...	$Y_{a,c}$	...	-	$Y_{a,c}$	$H_{1,2,\dots,N-1,1}(Y_{a,c}), \dots, H_{1,2,\dots,N-1,N}(Y_{a,c})$

Анализ с помощью табличного метода проводится последовательно, вначале в предположении, что системы, функционально связанные с данной системой, полностью работоспособны, а затем в предположении о возникновении определенных видов отказов указанных систем, приводящих к нарушениям входных характеристик системы.

В результате анализа составляется окончательный перечень видов отказов системы $\{R\}$ и причин их возникновения Z, X или \bar{Z}, X , а также совокупность состояний $\{H_Z\}_{R/X}$ или событий $\{S_Z\}_{R/X}$ приводящих к виду отказа R при входных характеристиках X , которые являются основой для составления функций

отказности системы и вычисления вероятностей возникновения видов отказов.

Вычисление вероятностей возникновения видов отказов системы и ранжирование причин отказов предусматривает:

построение функции отказности;

оценку вероятностей возникновения видов отказов по этапам полета;

ранжирование причин отказов в порядке уменьшения вероятности их возникновения.

Функция отказности является аналитической зависимостью вероятности отказа системы от показателей безотказности λ и q ее элементов, периодичности контроля состояния элементов, текущего времени полета и других параметров.

Функция отказности представляется в виде суммы вероятностей несовместных состояний, обуславливающей возникновение рассматриваемого вида отказа системы.

$$Q(R/x; t_{i-1}, t_i) = \sum_{\{H_z\}_{R/x}} K_{z+1} Q_0(H_z; t_n), \quad (1.21)$$

где $Q\left(\frac{R}{x}; t_{i-1}, t_i\right)$ - вероятность возникновения вида отказа

на i -м участке полета t_{i-1}, t_i при условии, что входные характеристики находятся в состоянии X ;

$Q_0(H_z; t_n)$ - вероятность возникновения состояния системы H_z за время полета при условии, что перед полетом все элементы были исправны;

Z - совокупность отказов $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma$ элементов, вызвавших при возникновении их в указанной последовательности переход системы в состояние H_z ;

$K_{z,i}$ - коэффициент влияния периодичности восстановления работоспособности элементов системы и продолжительности участков полета на вероятность возникновения состояния системы H_z ;

$\{H_z\}_{R/x}$ - совокупность состояний, различающихся индексами Z , которые приводят к виду отказа системы R , если входные характеристики находятся в состоянии X .

Вероятность возникновения за время t состояния r -го порядка $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma$ в указанной последовательности при условии полной исправности системы перед полетом определяется по формуле:

$$Q_0(H_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma, t}) = \lambda_\alpha \lambda_\beta^\alpha \lambda_\gamma^{\alpha, \beta}, \dots, \lambda_\sigma^{(\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho)} \frac{t^r}{r!} \left[1 - \sum_{l=1}^{r-1} \frac{(-1)^{l+1} B_l^{(\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho)} t_l^1}{(r+1)!} \right], \quad (1.22)$$

где $\lambda_\sigma^{(\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho)}$ - интенсивность σ -го отказа элемента, при условии возникновения отказов $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma$;

r - количество отказов, приведших систему в состояние H_z ;

r^1 - максимальная степень величины, которая учитывается при вычислении вероятности рассматриваемого отказа

$$B_l^{(\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho)} = \sum_l \lambda_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho}^{M_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho}}, \dots, \lambda_{\alpha, \beta}^{M_{\alpha, \beta}} \lambda_{\alpha}^{M_{\alpha}} \lambda_{0\alpha}^{M_0}. \quad (1.22)$$

При этом $M_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho} + M_{\alpha, \beta} + M_{\alpha} + M_0 = l$, а значения $M_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho}$, $M_{\alpha, \beta}$, M_{α} , M_0 могут быть только целыми числами от 0 до l ; суммирование производится в любой последовательности целых чисел, дающих в сумме число l ($l = 1, 2, \dots, r^1 - r$).

Значение $\lambda_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho}$ определяется суммой интенсивностей отказов, которые могут произойти, когда система находится в состоянии $H_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma}$.

При этом интенсивности отказов $\lambda_i^{(\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho)}$ соответствующих элементов определяются при условии, что система находится в состоянии $H_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho}$. Формулы для определения $Q_0(H_{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \rho, \sigma}; t)$ при наиболее применяемых значениях параметров r и r^1 приведены в табл. 1.4.

В тех случаях, когда при практических расчетах по формулам (1.22, 1.25, 1.27) даны статистические оценки $\hat{\lambda}$ или \hat{q} показателей безотказности элементов и их средние квадратические отклонения σ_{λ} и σ_q то с помощью этих формул составляются функции или $\hat{Q} = Q(\hat{\lambda})$, которые используются при вычислении оценок вероятностей \hat{Q} видов отказов системы и среднего квадратического

$$\sigma_{\hat{Q}} = \sqrt{\sum_{\mu} \left(\frac{\delta \hat{Q}}{\delta \lambda_{\mu}} \right)^2 \sigma_{\lambda_{\mu}}^2} \quad \text{или} \quad \sigma_{\hat{Q}} = \sqrt{\sum_{\mu} \left(\frac{\delta \hat{Q}}{\delta q_{\mu}} \right)^2 \sigma_{q_{\mu}}^2}. \quad (1.25)$$

Доверительные границы Q^H и Q^B вероятности \hat{Q} при произвольном законе распределения определяются по формулам:

$$Q^H = \hat{Q} - \sigma_{\hat{Q}} \sqrt{\frac{1}{1 - \beta_H}}, \quad (1.26)$$

$$Q^B = \hat{Q} + \sigma_{\hat{Q}} \sqrt{\frac{1}{1 - \beta_B}}, \quad (1.27)$$

где β_H и β_B - нижняя и верхняя доверительные вероятности соответственно.

Коэффициент $K_{Z,i}$ имеет вид:

$$K_{Z,i} = f_2 \left(n_{\alpha}, n_{\beta}, \dots, n_{\sigma}; v_i^{(s)} \right), \quad (1.28)$$

в котором введены относительные параметры:

$$n_{\sigma} = \frac{\tau_{\sigma}}{t_{\sigma}},$$

$$v_i^{(s)} = \frac{t_i^{(sv)} - t_{i-1}^{(s)}}{t_r^{(s)}},$$

где τ_{σ} - периодичность восстановления работоспособности элемента после его отказа σ -го вида;

t_i (t_{i-1}) - продолжительность полета до окончания i -го или $i - 1$ -го участка полета; $s = 1, 2, \dots, r$.

Таблица 1.4

Вероятность состояния систем при условии полной исправности системы перед полетом

Максимальная степень значения t	Вероятность возникновения состояния			
	$Q_0(H_\alpha; t)$	$Q_0(H_{\alpha,\beta}; t)$	$Q_0(H_{\alpha,\beta,\gamma}; t)$	$Q_0(H_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}; t)$
1	$\lambda_\alpha t$	-	-	-
2	$\lambda_\alpha t \left(1 - \lambda_0 \frac{t}{2}\right)$		-	-
3	$\lambda_\alpha t \left(1 - \lambda_0 \frac{t}{2} + \lambda_0^2 \frac{t^2}{6}\right)$	$\lambda_\alpha \lambda_\beta^\alpha \frac{t^2}{2} \left(1 - (\lambda_0 - \lambda_\alpha) \frac{t}{3}\right)$	$\lambda_\alpha \lambda_\beta^\alpha \lambda_\gamma^{(\alpha,\beta)} \frac{t^3}{6}$	-
4	$\lambda_\alpha t \left(1 - \lambda_0 \frac{t}{2} + \lambda_0^2 \frac{t^2}{6} - \lambda_0^3 \frac{t^3}{24}\right)$	$\lambda_\alpha \lambda_\beta^\alpha \frac{t^2}{2} \left(1 - (\lambda_0 - \lambda_\alpha) \frac{t}{3} + (\lambda_0^2 + \lambda_\alpha^2) \frac{t^2}{12} + \lambda_0 \lambda_\alpha \frac{t^2}{12}\right)$	$\lambda_\alpha \lambda_\beta^\alpha \lambda_\gamma^{(\alpha,\beta)} \frac{t^3}{6} (1 - \lambda_0 + \lambda_{\alpha,\beta}) \frac{t}{4}$	$\lambda_\alpha \lambda_\beta^\alpha \lambda_\gamma^{(\alpha,\beta)} \lambda_\gamma^{(\alpha,\beta,\gamma)} \frac{t^4}{24}$

Для вычисления вероятности возникновения вида отказа за время полета принимаются $t_{i-1} = 0$, $t_i = t_n$, тогда $v^s = 1$.

Формулы для определения наиболее употребляемых коэффициентов влияния $K_{Z,i}(n, v_i)$ приведены в табл. 1.5.

Безусловная вероятность $Q(R, t_{i-1}, t_i)$ возникновения отказа вида R на i -м участке полета может быть вычислена с использованием зависимостей:

$$Q(R; t_{i-1}, t_i) = \sum_{\{x\}} Q(R/x; t_{i-1}, t_i) P(x, t_{i-1}, t_i), \quad (1.29)$$

где (x, t_{i-1}, t_i) – вероятность возникновения состояния X входных характеристик на участке полета (t_{i-1}, t_i) .

Значение (x, t_{i-1}, t_i) может быть определено из анализа и расчета вероятностей видов отказов, состояние выходных характеристик которых соответствует состоянию X входных характеристик рассматриваемой системы.

Вероятность безотказной работы системы в этих случаях определяется по формуле:

$$P(t_{i-1}, t_i) = 1 - \sum_{\{x\}} Q(R/x; t_{i-1}, t_i) P(x_i, t_{i-1}, t_i). \quad (1.30)$$

На основе результатов вычислений проводится ранжирование выявленных причин отказов в порядке умножения вероятностей их возникновения для использования при разработке рекомендаций по повышению безотказности, а

Таблица 1.5

Коэффициенты влияния периодичности контроля работоспособности элементов при применении табличного метода

Максимальная степень значення t	Совокупность отказавших элементов Z	Вероятность состояния системы	Коэффициент влияния		Область применения формул
			$K_Z(n, v_i)$	$K_Z(n, 1)$	
1		$Q_0(H_{\alpha}, t)$	$K_Z(n, v_i)$	1	$v_i^{(1)}$ Без ограничений
2	α, β	$Q_0(H_{\alpha, \beta}, t)$	$(n_{\alpha} - 1)v_i^{(1)} + v_i^{(2)}$	n_{α}	$v_i^{(2)}$ Без ограничений
3	α, β, γ	$Q_0(H_{\alpha, \beta, \gamma}, t)$	$\frac{1}{2}(2n_{\alpha}^2 - 3n_{\alpha} + 1)v_i^{(1)} + \frac{3}{2}(n_{\alpha} - 1)v_i^{(2)} + v_i^{(3)}$	n_{α}^2	$v_i^{(3)}$ $n_{\alpha} \leq n_{\beta}$
4	$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	$Q_0(H_{\alpha, \beta, \gamma, \delta}, t)$	$\frac{1}{2}(3n_{\alpha}n_{\beta} - n_{\beta}^2 - 3n_{\alpha} + 1)v_i^{(1)} + \frac{3}{2}(n_{\alpha} - 1)v_i^{(2)} + v_i^{(3)}$ $(n_{\alpha}^3 - 2n_{\alpha}^2 + n_{\alpha})v_i^{(1)} + 2(n_{\alpha}^2 - 3n_{\alpha} + 1)v_i^{(2)} + 2(n_{\alpha} - 1)v_i^{(3)} + v_i^{(4)}$	$\frac{3n_{\alpha}n_{\beta} - n_{\beta}^2}{2}$ n_{α}^3	$v_i^{(3)}$ $v_i^{(4)}$ $n_{\alpha} \leq n_{\beta} \leq n_{\gamma}$ или $n_{\alpha} \leq n_{\gamma} \leq n_{\beta}$
			$(2n_{\alpha}n_{\beta}^2 - n_{\beta}^3 - 3n_{\alpha}n_{\beta} + n_{\beta}^2 + n_{\alpha})v_i^{(1)} + (3n_{\alpha}n_{\beta} - n_{\beta}^2 - 3n_{\alpha} + 1)v_i^{(2)} + 2(n_{\alpha} - 1)v_i^{(3)} + v_i^{(4)}$	$2n_{\alpha}n_{\beta} - n_{\beta}^3$	$v_i^{(4)}$ $n_{\beta} \leq n_{\alpha} \leq n_{\gamma}$ или $n_{\beta} \leq n_{\gamma} \leq n_{\alpha}$
			$(2n_{\alpha}n_{\beta}^2 - n_{\beta}^3 - 3n_{\alpha}n_{\beta} + n_{\beta}^2 + n_{\alpha})v_i^{(1)} + 2(n_{\alpha}^2 - 3n_{\alpha} + 1)v_i^{(2)} + 2(n_{\alpha} - 1)v_i^{(3)} + v_i^{(4)}$	$2n_{\alpha}^2 n_{\gamma} - n_{\alpha}^2 - n_{\gamma}^2$	$v_i^{(4)}$ $n_{\gamma} \leq n_{\alpha} \leq n_{\beta}$
			$(3n_{\alpha}n_{\beta}n_{\gamma} - n_{\gamma}n_{\beta}^2 - n_{\gamma}^2n_{\alpha} - 3n_{\beta}n_{\alpha} + n_{\beta}^2 + n_{\alpha})v_i^{(1)} + (3n_{\alpha}n_{\beta} - n_{\beta}^2 - 3n_{\alpha} + 1)v_i^{(2)} + 2(n_{\alpha} - 1)v_i^{(3)} + v_i^{(4)}$	$3n_{\alpha}n_{\beta}n_{\gamma} - n_{\alpha}n_{\gamma}^2 - n_{\gamma}n_{\beta}^2$	$v_i^{(4)}$ $n_{\gamma} \leq n_{\beta} \leq n_{\alpha}$

также при составлении программ испытаний и указаний экипажу по действиям при отказах.

С этой целью для каждого вида отказа с учетом значения совокупности входных характеристик $\{X\}$ определяется последовательность Z_1, Z_2, \dots, Z_z или Z_1, Z_2, \dots, Z_z , для которого

$$\begin{aligned} K_{Z_1} Q(H_{Z_1}, t_n) &\geq K_{Z_2} Q_0(H_{Z_2}, t_n) \geq \dots \geq K_{Z_L} Q_0(H_{Z_L}, t_n), \\ K_{\bar{Z}_1} Q_0(S_{\bar{Z}_1}, t_n) &\geq K_{\bar{Z}_2} Q_0(H_{\bar{Z}_2}, t_n) \geq \dots \geq K_{\bar{Z}_L} Q_0(H_{\bar{Z}_L}, t_n). \end{aligned}$$

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

2.1. Нормирование требований к надежности

Под нормированием требований к надежности понимается задание в нормативно-технической документации количественных значений показателей надежности и комплекса качественных требований к конструкции, технологии изготовления и правилам эксплуатации, выполнение которых обязательно для обеспечения требуемого уровня надежности. Количественные требования задаются в виде групповых и индивидуальных норм показателей надежности.

Под нормой показателя надежности понимается предельное значение показателя надежности, установленное в нормативно-технической документации. Групповая норма показателя надежности устанавливается для совокупности объектов данного типа. Индивидуальная норма показателя надежности устанавливается для единичного изделия данного типа.

Номенклатура стандартизованных показателей надежности, характеризующих количественные требования к надежности приведена в табл. 2.1.

Выбор нормируемых показателей надежности ЛА осуществляется из номенклатуры показателей, установленных государственными стандартами по надежности техники (табл. 2.1), отраслевыми стандартами по надежности авиационной техники, нормами летной годности самолетов и нормативными документами по нормированию, поэтапному подтверждению и контролю надежности. При выборе нормируемых показателей используются следующие рекомендации: общее число нормируемых показателей должно быть по возможности минимальным, выбранные показатели должны иметь простой физический смысл и должны допускать возможность расчета оценки на этапе проектирования и экспериментальной оценки при испытаниях и эксплуатации; нормируемые показатели должны быть связаны с показателями

Номенклатура показателей надежности

Свойство надежности	Вид показателя	Наименование показателя	Обозначение
Надежность в целом	Комплексные	Коэффициент сохранения эффективности	$K_{ЭФ}$
		Коэффициент оперативной готовности	$K_{ОГ}$
		Коэффициент технического использования	$K_{ТИ}$
		Коэффициент готовности	K_G
		Объединенная удельная продолжительность (трудоемкость) технического обслуживания и ремонта	S
		Удельная суммарная продолжительность (трудоемкость технического обслуживания(ремонта))	$S_{ТО}(S_P)$
		Удельное суммарное время восстановления работоспособного состояния	$T_{уд}$
		Удельная суммарная трудоемкость восстановления работоспособного состояния	S_B
Безотказность	Единичные	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
		Интенсивность отказов	$\lambda(t)$
		Средняя наработка до отказа	$T_{ср}$
		Гамма-процентная наработка до отказа	T_γ
		Средняя наработка на отказ	T_0
		Параметр потока отказов	$\omega(t)$
Долговечность	Единичные	Средний ресурс	$T_{ср}$
		Гамма-процентный ресурс	$T_{P\gamma}$
		Назначенный ресурс	$T_{РН}$
		Средний срок службы	$T_{сл}$
		Гамма-процентный срок службы	$T_{сл\gamma}$
		Назначенный срок службы	$T_{слн}$
Ремонтопригодность	Единичные	Среднее время восстановления работоспособного состояния	T_B
		Вероятность восстановления работоспособного состояния	$P_B(t)$
Сохраняемость	единичные	Средний срок хранения	T_X
		Гамма-процентный срок хранения	$T_{X\gamma}$
		Назначенный срок сохраняемости	$T_{ХН}$

эффективности эксплуатации ЛА, характеризующими безопасность и регулярность полетов, интенсивность использования и экономичность технической эксплуатации ЛА.

Номенклатура нормируемых показателей надежности ЛА в соответствии с отраслевыми нормативными документами приведена в табл. 2.2.

Вероятности возникновения особых ситуаций и невыполнения полетного задания (пп. 1-6 табл. 2.2) могут быть вычислены на основе информации о видах отказов и вероятностях их возникновения с использованием формулы

$$Q_A = \sum_i \sum_{\{R\}} q_A(t_{i-1}, t_i/R) Q(R; t_{i-1}, t_i),$$

где А - рассматриваемое событие (особая ситуация определенной категории или невыполнение полетного задания); i - участок полета продолжительностью $t_i - t_{i-1}$; $q_A(t_{i-1}, t_i/R)$ - вероятность возникновения события А на i -ом участке полета при условии, что в системе произошел отказ вида R.

Для определения вероятности возникновения события А за 1 ч следует пользоваться соотношением:

$$Q_A^{(1)} = \frac{Q_A}{t_n},$$

где t_n - продолжительность полета.

Наработка на отказ (неисправность) определяется по формуле

$$T_A = \frac{t_n}{Q_A},$$

где А - рассматриваемое событие (отказ, приведший к невыполнению полетного задания, отказ в полете, неисправность в полете и на земле), Q_A - вероятность возникновения события А за время полета.

Среднее число прерванных взлетов и вынужденных посадок (задержек и отстранений от рейсов), обусловленных неисправностями ЛА на 1000 вылетов, вычисляется по формуле вида:

$$K_{1000} = \frac{Q_A}{N_B} \cdot 1000,$$

где N_B - количество вылетов, А - рассматриваемое событие (прерванный взлет и посадка, задержка отправления в рейс), Q_B - вероятность возникновения события А в одном полете.

Нормируемые показатели надежности, характеризующие экономичность эксплуатации ЛА (пп. 11+15 табл. 2.2) имеют следующую структуру

$$\theta^{(1)} = \sum_{i=1}^S C_i \Omega_i,$$

где Ω_i параметр потока отказа i -го вида;

C_i - расходы (затраты) ресурсов (материальных, финансовых, трудовых, временных), связанных с устранением последствий (восстановление исправности, задержки рейсов, прерванные полеты) возникновения i -го отказа за 1 ч налета

Номенклатура нормируемых показателей надежности

Наименование показателя	Обозначение	Вид нормативного документа	Составляющие эффективности эксплуатации ЛА, характеризующиеся показателями
1.	2	3	4
1. Вероятность возникновения катастрофической ситуации, вызванной функциональными отказами за 1 ч. полета	$Q_{\text{кc}}^{(1)}$	НЛГС	Безопасность полетов
2. Вероятность возникновения аварийной ситуации, вызванной функциональными отказами за 1 ч. полета	$Q_{\text{ac}}^{(1)}$	То же	То же
3. Вероятность возникновения сложной ситуации, вызванной функциональными отказами за 1 ч. полета	$Q_{\text{cc}}^{(1)}$	“-“	“-“
4. Вероятность возникновения ситуации, усложнения условий полета, вызванной функциональными отказами за 1 ч. полета	$Q_{\text{ууп}}^{(1)}$	“-“	“-“
5. Вероятность невыполнения полетного задания, функциональными отказами за 1 ч. полета	$Q_{\text{мз}}^{(1)}$	Оперативные стандарты	Регулярность полетов
6. Нарботка на отказ, приведший к невыполнению полетного задания, ч.	$T_{\text{пз}}$	То же	То же
7. Среднее число прерванных взлетов и вынужденных посадок, обусловленных неисправностями ЛА, приходящихся на 1000 вылетов	$K_{1000 \text{ пв}}$	“-“	“-“
8. Среднее число задержек и отстранений от рейсов, обусловленных неисправностями ЛА на 1000 вылетов	M_{1000}	Отраслевые стандарты	Регулярность вылетов
9. Нарботка на отказ в полете, ч.	$T_{\text{оп}}$	То же	Безопасность и регулярность вылетов
10. Нарботка на неисправность, выявленную в полете и на земле, ч.	$T_{\text{т}}$	“-“	Готовность к применению и регулярность полетов

	2	3	4
11. Расход авиатоплива при прерванных полетах и работах по восстановлению исправности ЛА, т/ч налета	$Q_1^{(1)}$	Межведомственное положение	Экономичность эксплуатации
12. Затраты, связанные с задержками рейсов и прерванными полетами, руб./час налета	$Q_2^{(1)}$	То же	То же
13. Затраты на запасные части и материалы, используемые на восстановление исправности ЛА	$Q_3^{(1)}$	“-“	“-“
14. Трудоемкость работ, обусловленных восстановлением исправности ЛА, чел.-ч/ч налета	$Q_4^{(1)}$	“-“	“-“
15. Суммарное время задержек рейсов и время восстановления исправности ЛА, отстраненного от рейса с момента запланированного вылета, ч/ч налета	$Q_5^{(1)}$	“-“	“-“

Для определения вероятности возникновения события А за 1 ч следует пользоваться соотношением:

$$Q_A^{(1)} = \frac{Q_A}{t_n},$$

где t_n - продолжительность полета.

Наработка на отказ (неисправность) определяется по формуле

$$T_A = \frac{t_n}{Q_A},$$

где А - рассматриваемое событие (отказ, приведший к невыполнению полевого задания, отказ в полете, неисправность в полете и на земле), Q_A - вероятность возникновения события А за время полета.

Среднее число прерванных взлетов и вынужденных посадок (задержек и отстранений от рейсов), обусловленных неисправностями ЛА на 1000 вылетов, вычисляется по формуле вида:

$$K_{1000} = \frac{Q_A}{N_B} \cdot 1000,$$

где N_B - количество вылетов, А - рассматриваемое событие (прерванный взлет и посадка, задержка отправления в рейс), Q_B - вероятность возникновения события А в одном полете.

Нормируемые показатели надежности, характеризующие экономичность эксплуатации ЛА (пп. 11+15 табл. 2.2) имеют следующую структуру

$$\theta^{(1)} = \sum_{i=1}^S C_i \Omega_i,$$

где Ω_i параметр потока отказа i -го вида;

C_i - расходы (затраты) ресурсов (материальных, финансовых, трудовых,

временных), связанных с устранением последствий (восстановление исправности, задержки рейсов, прерванные полеты) возникновения i -го отказа за 1 ч налета.

Нормы показателей надежности объектов выбирают с учетом: достигнутого уровня и выявленных тенденций повышения надежности отечественных и зарубежных аналогов; результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; технико-экономических возможностей промышленности. Нормы показателей надежности должны быть оптимальными с учетом установленных ограничений массы, объема и (или) стоимости изделия. Критериями оптимизации должны быть достижение заданной эффективности при минимальных суммарных затратах на разработку, изготовление, эксплуатацию и ремонт изделия или достижение максимума эффективности при заданных суммарных затратах.

Нормы показателей надежности устанавливаются применительно к режиму и условиям эксплуатации, указанным в технических условиях. Нормы показателей надежности должны быть не ниже норм, установленных директивными документами; увязаны с нормами показателей надежности объекта, в который входит данное изделие, нормами показателей надежности составных частей изделия и гарантиями изготовителя; технико-экономическими обоснованиями, перспективными значениями показателей.

При нормировании показателей надежности различают следующие уровни структуры объекта:

- 1) летательный аппарат в целом, выполняющий самостоятельные функции и характеризуемый технико-экономическими и оперативно-техническими показателями надежности и эффективности функционирования;
- 2) функциональная система, выполняющая частные функциональные задачи и характеризуемая техническими показателями надежности;
- 3) комплектующие изделия (составные части конструкции), представляющие собой элементную базу систем.

В связи с этим рассматриваются два вида задач: нормирование показателей надежности летательного аппарата в целом (функциональной системы) и распределение нормы показателя надежности между элементами (комплектующими изделиями, составными частями).

Применяются следующие способы нормирования показателей надежности.

А. Экспертное (директивное) задание требований, основанное на общей инженерной интуиции и практическом опыте.

Б. Задание требований по прототипу, основанное на анализе имеющейся статистической информации по надежности существующих объектов, близких к рассматриваемому по назначению, структуре и элементной базе. Требования по надежности в этом случае задаются: с учетом возможного роста надежности элементной базы, изменения масштаба рассматриваемой системы по сравнению с прототипом. Такой прогноз в значительной степени также опирается на экспертные оценки, однако подтверждается конкретными фактическими данными.

В. Задание оптимального уровня надежности, определяемого в том случае, когда:

выходной эффект от функционирования системы измеряется в тех же (обычно стоимостных) единицах, что и затраты на ее создание;

достоверно известны исходные данные о надежности элементной базы;

полностью определены принципы построения структуры и процессов функционирования (возможности резервирования, использование различной элементом базы, режимы использования, технического обслуживания и ремонта).

В последнем случае нормативные значения показателей надежности устанавливаются на основе: оценок нормируемых показателей надежности и издержек, обусловленных отказами, по результатам эксплуатации группы ЛА, принимаемых за базовые; оценок ожидаемых издержек заказчика, обусловленных отказами, при эксплуатации вновь создаваемого проектируемого ЛА.

По результатам эксплуатации группы базовых ЛА N определяются оценки Q_{ij} каждого i -го нормируемого показателя надежности для j -го ЛА $i = \overline{1, K}$, $j = \overline{1, N}$. Определяются базовые значения θ_i^B нормируемых показателей надежности и средний годовой налет W^B базового ЛА

$$\theta_i^B = \frac{\sum_{j=1}^N \theta_{ij}}{N},$$

$$W^B = \frac{\sum_{j=1}^N W_j}{N}.$$

На основе технико-экономического анализа системы эксплуатации группы базовых ЛА и проектируемого ЛА находятся зависимости дополнительных издержек Δ_I и недополученного дохода Δ_D , обусловленное ненадежностью ЛА

$$\Delta_I^B = \Delta_I^B(\theta_1, \dots, \theta_K) = I^B(\theta_1, \dots, \theta_K) - I_Y^B,$$

$$\Delta_I^H = \Delta_I^H(\theta_1, \dots, \theta_K) = I^H(\theta_1, \dots, \theta_K) - I_Y^H,$$

$$\Delta_D^B = \Delta_D^B(\theta_1, \dots, \theta_K) = D_Y^B - D^B(\theta_1, \dots, \theta_K),$$

$$\Delta_D^H = \Delta_D^H(\theta_1, \dots, \theta_K) = D_Y^H - D^H(\theta_1, \dots, \theta_K),$$

где индексы Б - базового, Н - ненадежность проектируемого ЛА.

Определяется коэффициенты дополнительных издержек γ_I^B и недополученного дохода γ_D^B для базовых ЛА

$$\gamma_I^B = \frac{\Delta_I^B(\theta_1^B, \dots, \theta_K^B)}{\mathcal{E}^B W^B},$$

$$\gamma_D^B = \frac{\Delta_D^B(\theta_1^B, \dots, \theta_K^B)}{T^B V^B W^B},$$

где \mathcal{E}^B - себестоимость летного часа базового ЛА без учета амортизационных отчислений на реновацию; T^B тариф для базового ЛА за единицу работы; V^B - часовая производительность базового ЛА.

Не превышение коэффициентов дополнительных издержек и недополученного дохода проектируемого ЛА соответствующих коэффициентов базового ЛА является

исходным положением для установления области определения норм показателей надежности. Критерием выбора норм показателей надежности из этой области является минимизация усилий поставщика по реализации этих норм на этапе создания ЛА.

Тогда задача определения нормы показателей надежности Q_1, \dots, Q_k для проектируемого ЛА заключается в минимизации выражения

$$\sum_{i=1}^k \ln^2 \frac{\theta_i}{\theta_i^0} \rightarrow \min$$

при выполнении ограничений

$$\begin{aligned} \Delta_I^H(\theta_1, \dots, \theta_k) &\leq \gamma_I^B \Xi^H W^H, \\ \Delta_D^H(\theta_1, \dots, \theta_k) &\leq \gamma_D^B T^H W^H. \end{aligned}$$

Данная оптимизационная задача решается, как правило, с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа.

В общем виде задача определения оптимальных норм показателей надежности сводится к максимизации условий функции вида

$$F_K(R) = E_K(R) - C_R(R),$$

где R - показатель надежности системы, зависящий от K -го варианта структуры sk и от надежности элементов i -го типа g_i т.е.

$$R = R(S_K, g_i, K = 1, \dots, m, i = 1, \dots, m),$$

где t - число рассматриваемых вариантов структуры; p - число различных комплектующих элементов; $E_K(R)$ - выходной эффект от функционирования k -го варианта системы в стоимостном выражении при уровне надежности R ; $C_R(R)$ - затраты на обеспечение уровня надежности R для K -го варианта системы. Для фиксированного K решение находится из условия

$$\partial E_K(R) / \partial R = \partial C_R(R) / \partial R.$$

после чего выбирается вариант, для которого достигается наибольшее абсолютное значение из оптимальных решений $E_K(R)$.

Задача распределения нормы показателя надежности системы (подсистемы) между подсистемами (элементами) решается следующими методами;

А. Метод равнонадежного распределения. Если система состоит из N примерно близких по сложности (т.е. по структуре и числу входящих элементов) подсистем, то можно заданный показатель надежности R типа вероятности безотказной работы, коэффициента оперативной готовности или коэффициента готовности распределить по правилу

$$R_i = \sqrt[N]{R}, i = 1, \dots, N.$$

Задаваемая средняя наработка на отказ для i -й подсистемы равна $T_i = NT$, $i=1, \dots, N$ - заданная средняя наработка на отказ системы.

Б. Метод пропорционального распределения. Если n_i - число элементов в i -й подсистеме, то

$$R_i = \sqrt[n_i]{R}, i = 1, \dots, N, a_i = n_i (\sum n_i)^{-1}, 1 \leq i \leq N.$$

Под n_i в данном случае следует понимать число в некотором смысле "приведенных элементов". Если известны интенсивности отказов элементов (или прототипов элементов) j -го типа λ_j , то метод пропорционального распределения можно модифицировать, положив $a_i = \sum_{1 \leq j \leq M} \lambda_j I_{ij} (\sum_{1 \leq i \leq N} \sum_{1 \leq j \leq N} \lambda_j I_{ij})^{-1}$.

В. Метод распределения по прототипу. Различие условий работы элементов в отличие от равнонадежного и пропорционального распределения можно учесть при нормировании показателей надежности путем использования данных по надежности подсистем (элементов) прототипа.

Предположим, что удельные веса вероятности отказов \tilde{q}_i элементов i -го типа в проектируемой конструкции должны быть такими же, как в конструкции, принятой за прототип. Тогда нормирование надежности заключается в том, чтобы распределить допустимую ненадежность $(1 - P_{mp})$ проектируемой конструкции по элементам с учетом удельных весов вероятности отказов. Последние находятся по вероятности безотказной работы P_{Σ}^n конструкции прототипа и вероятности безотказной работы P_i^n i -го ее элемента, аналогично рассматриваемому элементу конструкции по зависимости

$$\tilde{q}_i = \frac{1 - P_i^n}{1 - P_{\Sigma}^n}$$

или

$$\tilde{q}_i = \frac{T_{\Pi}^n}{T_{\Pi_i}^n},$$

где T_{Π}^n , $T_{\Pi_i}^n$ - наработка на отказ, выявленный в полете для системы и i -го элемента прототипа соответственно.

Зная удельные веса отказов \tilde{q}_i по прототипу, определим требуемые уровни надежности элементов проектируемой конструкции

$$P_i = 1 - (1 - P_{mp}) \tilde{q}_i.$$

По английским требованиям для транспортного самолета при $P_{\Pi} = 0,95$, $t_{\Pi} = 4$ ч или при наработке на отказ в полете $T_{\Pi} = 80$ ч задается следующее распределение отказов в полете по отдельным системам (табл. 2.3).

Г. Метод оптимального распределения. Если при оптимизации норм показателей надежности для системы в целом R известны структура системы S и методы повышения надежности подсистем (элементов), т.е. функции $R_i(C_i)$, где C_i - ресурс, затрачиваемый на обеспечение надежности подсистемы, то можно найти оптимальное распределение нормы показателя надежности для двух случаев:

а) максимум показателя надежности системы при ограничениях на суммарные ресурсы C^0

$$\max\{(R(S, R_i(C_i)) / \sum_{1 \leq i \leq N} C_i) \leq C^0\}, C = (C_1, C_2, \dots, C_N).$$

б) минимум затрат на систему при достижении заданного показателя надежности $\min\{C(S, R_i(C_i)) / R^0\}$.

Таблица 2.3

Распределение отказов в полете по функциональным системам ЛА

Наименование системы	Наработка на отказ в полете, ч	\tilde{q}_1
Планер	770	0,104
Двигатель	410	0,197
Управление	6650	0,012
Кондиционирование	686	0,115
Радио-пилотажно-навигационное	210	0,388
Электрооборудование	785	0,102
Приборы	2780	0,029
Энергоснабжение	2500	0,031
Спасение	5900	0,013

Обе задачи решаются способами дискретного программирования, как задачи на условную оптимизацию.

Порядок выполнения работ по нормированию показателей надежности при проектировании и испытаниях ЛА приведен в табл. 2.4.

2.2. Требования к надежности по обеспечению безопасности полетов

К директивным документам, регламентирующим нормы надежности для авиационной техники, относятся "Нормы летной годности гражданских самолетов" (НЛГС), которые устанавливают следующие требования по обеспечению безопасности полетов:

любое отказное состояние (функциональный отказ), приводящее к возникновению катастрофической ситуации, оценивается как событие не более частое, чем практически невероятное или чтобы суммарная вероятность возникновения катастрофической ситуации, вызванной отказными состояниями (функциональными отказами), для самолета в целом не превышала значения, соответствующего 10^{-7} на один час полета;

суммарная вероятность возникновения аварийной ситуации, вызванной отказными состояниями (функциональными отказами), для самолета в целом не превышала 10^{-6} на один час полета; при этом рекомендуется, чтобы любое отказное состояние (функциональный отказ), приводящее к аварийной ситуации, оценивалось как событие не более частое, чем крайне маловероятное;

Таблица 2.4

Состав работ по нормированию показателей надежности при проектировании и испытаниях ЛА

Наименование работ	Стадии проектирования и испытания
1.Определение номенклатуры и значений нормируемых показателей надежности	Техническое предложение (аванпроект)
2. Назначение норм показателей надежности	Техническое задание
3.Корректировка норм показателей надежности	Эскизный проект Технический проект
4.Подтверждение норм показателей надежности	Государственные (приемочные) испытания Эксплуатационные испытания Приемо-сдаточные и контрольно-серийные испытания

суммарная вероятность возникновения сложной ситуации, вызванной отказными состояниями (функциональными отказами), для самолета в целом не превышала 10^{-4} на один час полета; при этом рекомендуется, чтобы любое отказное состояние (функциональный отказ), приводящее к сложной ситуации, оценивалось как событие не более частое, чем маловероятное.

В соответствии с требованиями НЛГС конструкция самолета должна быть такой, чтобы под воздействием повторяющихся в эксплуатации нагрузок и температур в течение определенной наработки (назначенного ресурса), ее повреждения, которые могут непосредственно привести к катастрофической ситуации, были практически невероятными. Удовлетворение этому требованию, помимо создания соответствующей конструкции самолета, должно обеспечиваться производственно-технологическими процессами изготовления и ремонта, техническим обслуживанием и соблюдением установленных норм и условий эксплуатации и подтверждается результатами расчетов, исследованием фактических условий эксплуатации, в том числе действующих нагрузок, результатами лабораторных испытаний на выносливость и живучесть (безопасность повреждения) и опытом эксплуатации самолетов данного типа и самолетов аналогичных типов.

При установлении ресурса должно учитываться влияние износа и возможное снижение прочностных характеристик конструкции, вызываемое температурными воздействиями, коррозией, а также другими условиями эксплуатации и хранения.

В процессе эксплуатации должен осуществляться систематический контроль состояния конструкции, обеспечивающий выявление контролируемых факторов, приводящих к недопустимому снижению усталостной прочности конструкции (коррозия, износ, случайные механические повреждения).

Ресурс конструкции самолета устанавливается по ресурсу конструктивных элементов, разрушение или появление повреждений в которых может непосредственно привести к катастрофической ситуации. Разрушения или повреждения в элементах конструкции, непосредственно не угрожающие безопасности полетов, могут не приниматься во внимание при установлении ресурса всей конструкции.

Если для отдельных элементов конструкции, которые могут быть заменены в процессе эксплуатации, имеется свой ресурс, для конструкции в целом ресурс следует устанавливать без учета ресурса этих элементов.

Обеспечение достаточной выносливости самолета для опасных по усталостной прочности мест конструкции, устанавливаемых на основе расчетов и имеющегося опыта, должно предусматриваться с учетом требуемого ресурса уже на стадии проектирования. При этом должно быть обращено внимание на выбор соответствующего материала, общую напряженность конструкции, максимально возможное снижение концентрации напряжений, рациональность технологии изготовления элементов конструкции и их сборки, надежность системы контроля качества изготовления продукции, а также максимальное повышение выносливости на основе использования соответствующих конструктивно-технологических мероприятий.

Эффективность мероприятий должна проверяться лабораторными испытаниями на выносливость отдельных конструктивных элементов (узлов, стыков, панелей, отсеков и др.).

При проектировании самолета следует предусматривать меры, обеспечивающие живучесть (безопасное повреждение) основной силовой конструкции, а именно:

должны быть по возможности обеспечены условия осмотра или инструментального контроля основных силовых элементов конструкции в процессе эксплуатации самолетов, особенно в местах повышенной концентрации напряжений и вероятных зонах возникновения усталостных повреждений;

должно быть обеспечено возможно более медленное развитие вероятных усталостных повреждений с тем, чтобы остаточная прочность и жесткость конструкции вплоть до момента надежного обнаружения повреждения при осмотре (инструментальном контроле) были достаточны для безопасной эксплуатации самолета.

В НЛГС предусмотрено, что безопасность конструкции по условиям прочности подтверждается на следующих этапах эксплуатации самолета:

а) перед началом регулярной эксплуатации при установлении начального назначенного ресурса;

б) в процессе эксплуатации по мере выработки ранее установленного ресурса; при этом производится последовательное (поэтапное) установление увеличенных значений назначенного ресурса (вплоть до ресурса до списания) на основе повышения достоверности сведений об условиях нагружения конструкции и характеристиках ее усталостной прочности, анализа и учета влияния условий эксплуатации и по мере нахождения опыта эксплуатации.

Значения начального назначенного ресурса до списания должны соответствовать значениям, указанным в ожидаемых условиях эксплуатации.

По результатам работ, проведенных на всех этапах установления назначенных ресурсов, изготовитель и заказчик в установленном порядке должны вносить соответствующие изменения и рекомендации в эксплуатационную и ремонтную документацию.

Назначенный ресурс конструкции самолета, выражаемый количеством летных часов и числом полетов или количеством циклов функционирования, не должен превышать:

либо допустимую наработку в эксплуатации по условиям выносливости конструкции;

либо допустимую наработку в эксплуатации с учетом живучести (безопасного повреждения) конструкции.

При этом под допустимой наработкой в эксплуатации понимается следующее:

допустимая наработка в эксплуатации по условиям выносливости - это наработка, в пределах которой необходимый уровень безопасности (предотвращение самолета, характеризующегося наличием усталостных повреждений, снижающих остаточную прочность ниже допустимого уровня) обеспечивается без специальных осмотров конструкции;

допустимая наработка в эксплуатации с учетом живучести - наработка, в пределах которой обеспечение необходимого уровня безопасности требует специальных осмотров конструкции, направленных на предотвращение состояния, характеризующегося наличием повреждений, снижающих остаточную прочность ниже допустимого уровня.

Программа испытаний на выносливость должна основываться на:

1) типовом полете или совокупности типовых полетов совместно с относительной долей их осуществления, включающей режимы буксировки, выруливания на старт, опробования двигателей на земле, разбега, набора высоты, полета на крейсерском режиме, снижения, захода на посадку, пробега и заруливания на стоянку, с учетом их продолжительности (протяженности) и совокупности других параметров, характеризующих каждой из указанных режимов;

2) повторяемости нагрузок, вызванных воздействием атмосферной турбулентности, с учетом различных высот полета и различных географических районов, соответствующих трассам эксплуатации самолета;

3) повторяемости маневренных нагрузок, связанных с условиями и правилами эксплуатации самолета данного типа;

4) повторяемости нагрузок при посадке, при работе двигателей и при движении по земле (буксировка, руление, разбег, пробег);

5) повторяемости нагрузок при использовании средств механизации крыла и различных способов торможения самолета в воздухе и на земле, а также при применении в полете различного рода автоматических устройств;

6) повторяемости избыточного давления в герметической кабине в процессе нормальной эксплуатации и при ее опрессовке при ремонте.

Программы испытаний конструкции в целом должна также учитывать такого рода нагрузки, как высокочастотные нагрузки от струи винта или реактивного двигателя, от пульсаций аэродинамического давления, нагрузки от неравномерного нагрева конструкции, нагрузки от дисбаланса колес и, другие, если на основе проведенного анализа или имеющегося опыта установлено, что эти нагрузки могут повлиять на ресурс рассматриваемой конструкции.

При испытаниях на выносливость подвижных элементов силовой конструкции (система выпуска и уборки шасси, закрылков и др.) производится необходимое сочетание переменных нагрузок и движения с целью учета выяснения износа и коррозии в сочленениях, а также изменений напряженности, связанных с кинематикой движения, если на основе проведенного анализа или имеющегося опыта установлено, что это влияние может оказаться существенным.

Допустимая наработка в эксплуатации, соответствующая характеристикам выносливости, полученным при лабораторных испытаниях идентичных конструкций по одной и той же программе, определяется делением на суммарный коэффициент надежности среднего числа циклов (блоков) испытаний, которое конструкция выдержала. Величина суммарного коэффициента надежности должна определяться как

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4.$$

Величина коэффициента η_1 , учитывающего уровень соответствия структуры программы испытаний на выносливость характеру реальных нагрузок в эксплуатации, принимается в диапазоне $1 < \eta_1 < 1,5$

Величина коэффициента η_2 , учитывающего степень опасности разрушения, принимается в диапазоне $1 < \eta_2 < 1,2$.

Величина коэффициента η_3 , учитывающего достоверность данных о повторяемости нагрузок, действующих на самолет, принимается равной в диапазоне $1 < \eta_3 < 2$

Величина коэффициента η_4 , учитывающего разброс свойств выносливости, принимается в зависимости от числа испытаний идентичных конструкций.

Число образцов	1	2	3	4	5	С
η_4	5,0	4,0	3,5	3,2	3,1	3

Если во время испытаний на выносливость разрушается или повреждается какой-либо конструктивный элемент, то его заменяют новым или проводят ремонт поврежденного места; рекомендуется до замены (ремонта) после обнаружения

повреждения провести нагружения до определенного приемлемого числа циклов с целью изучения длительности развития повреждения. Испытания должны продолжаться для выявления других критических мест конструкции и проверки эффективности ремонта. При этом наработка заменяемого или отремонтированного конструктивного элемента отсчитывается с начала его испытаний, а всей остальной конструкции - по суммарному объему испытаний.

Допустимая наработка конструкции в эксплуатации с учетом живучести (безопасного повреждения) определяется на основе лабораторных испытаний на выносливость и живучесть конструкции в целом, соответствующих расчетов выносливости, а также таких лабораторных испытаний на живучесть, которые по условиям нагружения и закрепления приближаются к условиям испытания конструкции в целом.

Лабораторные испытания на живучесть (безопасность повреждения) проводятся с целью подтверждения того, что остаточная прочность конструкции при возможном ее усталостном повреждении или частичном (полном) разрушении отдельных конструктивных элементов сохраняет величину, необходимую для обеспечения безопасности полета. Места и степень повреждений, создаваемых при лабораторных испытаниях на живучесть, определяются в зависимости от конкретного типа конструкции и возможности обнаружения повреждения в эксплуатации с учетом контролепригодности конструкции и скорости развития повреждений под действием переменных нагрузок, ожидаемых в эксплуатации.

Минимальная допустимая остаточная прочность при наиболее неблагоприятном расположении повреждения (разрушения) по отношению к неповрежденной части конструкции должна соответствовать нагрузке в диапазоне от $0,67 P^p$ до P^p , где P^p - расчетная нагрузка соответствующего случая нагружения, определяющая необходимую прочность рассматриваемого места поврежденной конструкции. Величина нагрузки в каждом отдельном случае определяется на основе специального анализа.

Допустимая наработка в эксплуатации до начала осмотров и между осмотрами определяется делением на суммарный коэффициент надежности η среднего числа циклов (блоков) испытаний, которое конструкция выдержала соответственно до достижения усталостным повреждением его критической величины и на стадии развития усталостного повреждения от максимального не обнаруживаемого в эксплуатации размера до критической величины.

Величина максимального не обнаруживаемого в эксплуатации размера усталостного повреждения устанавливается конкретно для каждой рассматриваемой зоны конструкции с учетом разрешающей способности методов контроля, применяемых при осмотрах.

Назначенный ресурс последовательно (по этапам) увеличивается по мере выработки начального или очередного назначенного ресурса на основании:

уточнения характера и условий эксплуатации парка самолетов;

уточнения, при необходимости, нагруженности агрегатов самолета по

результатам специальных летных испытаний;

накопления статистики по повторяемости перегрузок в части тяжести при полетах самолетов данного типа;

результатов, в случае необходимости, дополнительных лабораторных испытаний на выносливость и живучесть (безопасность повреждений) в том числе конструкций с наработкой в эксплуатации;

опыта эксплуатации самолетов данного типа.

Безопасность эксплуатации в пределах назначенных ресурсов контролируется опытом эксплуатации всего парка и группы головных рейсовых самолетов. В качестве самолетов головной группы назначаются самолеты, максимально опережающие по наработке остальной парк. Численность и состав группы головных самолетов устанавливается конкретно для каждого типа самолета. На каждом вылете самолетов головной группы в повышенном объеме непрерывно проводится учет условий его эксплуатации, а также условий нагружения на базе штатных и, в случае их установки, специальных средств.

На самолетах головной группы используются наиболее эффективные методы оценки технического состояния, в том числе новейшие средства неразрушающего контроля целостности конструкции.

Одновременно с установлением увеличенных назначенных ресурсов определяются и уточняются условия обеспечения безопасности полетов в пределах установленного ресурса, в том числе:

места конструкции, подлежащие систематическому контролю в эксплуатации и при ремонтах, а также перечни замен и доработок конструкции с указанием сроков (периодичности) этих мероприятий;

условия эксплуатации самолета и их соответствие условиям, принятым при установлении очередного назначенного ресурса.

2.3. Проектирование элементов конструкции на заданную надежность

Вероятность неразрушения элемента конструкции является некоторой функцией вероятностных характеристик нагрузок и несущих способностей по возможным предельным состояниям, а, следовательно, вероятностных характеристик всех возмущающих параметров, обуславливающих случайный характер нагружения и напряженно-деформированного состояния.

Можно указать две основные модели возникновения отказа конструкции: мгновенное повреждение и накопление повреждений. Вследствие различия этих моделей отказов отличается и представление параметров состояния. Для случая мгновенных повреждений в качестве параметра состояния можно использовать разность несущей способности R и нагрузки S

$$Z=R-S,$$

или их отношение, называемое коэффициентом запаса

$$K = \frac{R}{S}.$$

Для случая накопления повреждений в качестве параметра состояния принимают суммарное относительное повреждение (накопленную усталость)

$$\vartheta = \sum_i \frac{Q_i}{Q_{\text{imp}}},$$

где Q_i - сумма повреждений, накопленных конструкцией на i -м этапе эксплуатации; Q_{imp} - предельное значение меры повреждения в условиях i -го этапа эксплуатации.

В зависимости от выбора параметров состояния различно формулируется вероятность неразрушения конструкции.

Для случая одного возможного предельного состояния при использовании разностного параметра состояния (2.1) вероятность неразрушения

$$P = \tau\{i > 0\},$$

при использовании коэффициента запаса (2.2)

$$P = \tau\{k > 1\},$$

а в случае накопления повреждений (2.3)

$$P = \tau\{\vartheta < 1\}.$$

Понятие коэффициента запаса взято из расчета на прочность, но в отличие от традиционного детерминированного коэффициент запаса, определяемый выражением (2.2), является случайной величиной или математическим ожиданием случайной величины.

В случае одного возможного предельного состояния при мгновенном повреждении и отсутствии корреляции

$$P = \tau\{z = R - S > 0\} = \varphi\left(\frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}}\right) = \varphi(L).$$

Представим вероятность не разрушения функцией безразмерных параметров: среднего коэффициента запаса

$$\eta = \frac{m_R}{m_S},$$

коэффициента вариации нагрузки

$$V_S = \frac{\sigma_S}{m_S},$$

коэффициента вариации несущих способностей

$$V_R = \frac{\sigma_R}{m_R}.$$

Тогда аргумент функции (2.4) при нормальном распределении случайной величины примет вид

$$L = \frac{\eta - 1}{\sqrt{\eta^2 V_R^2 + V_S^2}}.$$

Отметим, что средний коэффициент запаса характеризует смещение математического ожидания несущей способности относительно математического

ожидания нагрузки (рис. 2.1).

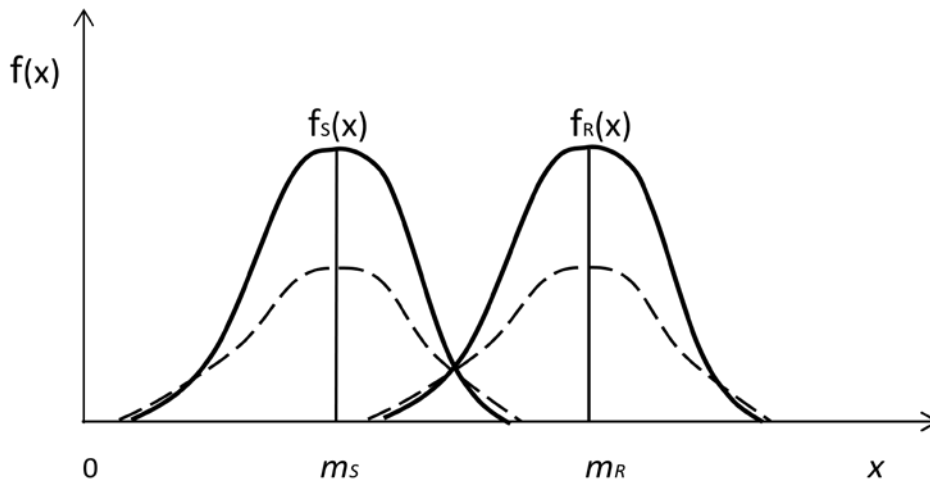


Рис. 2.1. Смещение математического ожидания несущей способности относительно математического ожидания нагрузки.

Увеличением коэффициента запаса η можно в принципе обеспечить при фиксированных разбросах сколь угодно высокую надежность конструкции.

Проектирование элемента конструкции на заданную надежность заключается в отыскании наиболее доступных путей воздействия на его конструкцию и условия работы, в результате которого вероятность неразрушения элемента достигла бы требуемого значения. Однако, не на все вероятностные характеристики можно воздействовать. Так, нормированные корреляционные функции возмущающих параметров, нагрузок и несущих способностей определяются природой соответствующих случайных функций, их "внутренней структурой" и практически не поддаются заранее предусмотренному воздействию.

При неизменности технологических процессов производства и условий работы конструкции можно ожидать стабильность таких относительных характеристик рассеивания, как коэффициенты вариации. Некоторого, хотя и незначительного уменьшения коэффициента вариации можно добиться ужесточением допусков, но такой путь воздействия не может стать основным в обеспечении заданной надежности конструкции.

Поэтому остается практически один приемлемый путь - воздействие на возмущающие параметры изменением их математических ожиданий. Однако далеко не на все возмущающие параметры можно воздействовать и этим путем. Наиболее просто изменить математические ожидания таких параметров несущей способности, как толщина стенок, площади сечения и моменты инерции профилей силового набора.

Для изменения предела прочности и модуля упругости приходится заменять конструкционный материал.

В значительно меньшей степени подвержены воздействию возмущающие параметры нагрузок.

Задачу определения величины воздействия на элемент конструкции с целью доведения его надежности до требуемой во многих случаях целесообразно решать в два этапа: сначала «на уровне несущих способностей и нагрузок», определяя требуемые значения средних коэффициентов запаса η , затем «на уровне возмущающих параметров» находят требуемые значения u_i конструктивных параметров x_i несущих способностей, а если возможно то и параметров X_i нагрузок, изменением математических ожиданий которых предполагается реализовать намеченное воздействие.

Рассмотрим проектирование на заданную надежность на простейшем примере одного предельного состояния. Будем считать, что коэффициент вариации V_S и V_R стабильны для всех элементов конструкции данного типа, а, следовательно, их значения могут быть приняты по отработанным ранее аналогичным элементам. При нормальном законе распределения параметра состояния вероятность неразрушения определяется выражением (2.5). Представив это уравнение относительно искомого значения коэффициента запаса η , находим

$$\eta = \frac{1 + \sqrt{1 - (1 - L^2 V_S^2)(1 - L^2 V_R^2)}}{1 - L^2 V_R^2},$$

где L - квантиль, отвечающий требуемой вероятности неразрушения элемента P_{Tr} .

2.4. Производственно-технологические методы обеспечения надежности

Высокий уровень проектно-конструкторской разработки ЛА еще не гарантирует надежной работы в эксплуатации, если при изготовлении не будет обеспечена его высокая надежность.

Доля отказов в эксплуатации машин различных типов по производственно-технологическим причинам составляет в среднем величину порядка 35%, а для некоторых машин 40/85%. При производстве ГТД эта величина составляет около 30%.

Для анализа взаимосвязи различных факторов, влияющих на надежность изделий, и определения основных направлений совершенствования производственно-технологических методов рассмотрим принципиальную схему, приведенную на рис. 2.2.

Как следует из схемы, качество реальной конструкции определяется чертежом, техническими условиями (ТУ) и технологией изготовления. Для пояснения степени влияния производственно-технологических факторов введем обозначения в терминах теории множеств. Множество элементов, составляющих чертеж и ТУ, обозначим B (размеры, допуски, взаимосвязь линий и поверхностей, материал, термообработка и т.д.), а множество элементов, определяющих реальное изделие, A .

Множество B всегда меньше множества A : $B < A$, Взаимное расположение множеств A и B представлены на рис. 2.3.

Признаки, входящие в множество B , состоят из двух групп: первая, основная группа (множество C) состоит из признаков реальной детали, выполненных в полном соответствии с чертежом и ТУ, вторая группа (множество D) состоит из признаков, выполненных не в соответствии с требованиями чертежа и ТУ. Зона определяет брак производства. Очевидно, $C + D = B$, $B + E = A$.

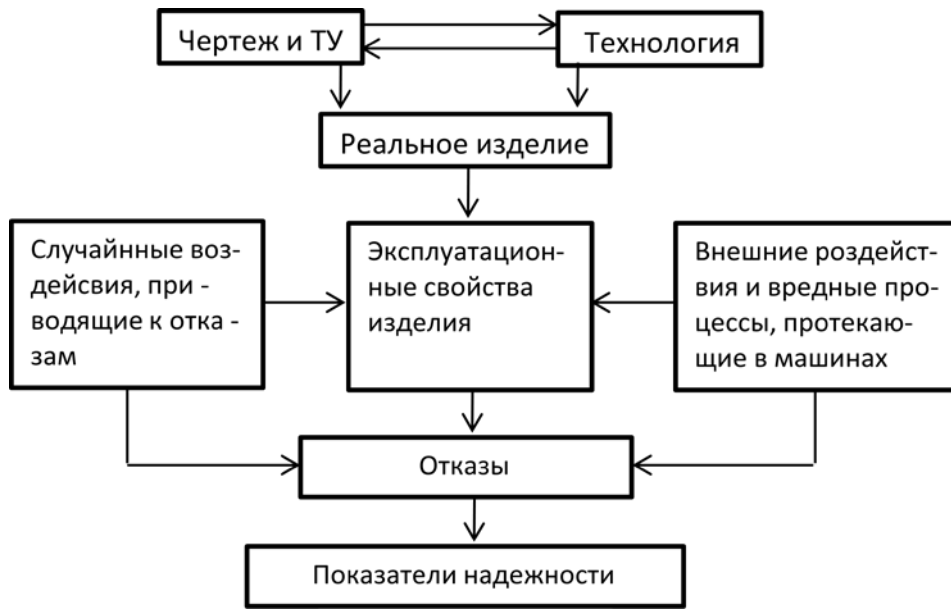


Рис. 2.2. Принципиальная схема взаимосвязи факторов, влияющих на надежность изделий

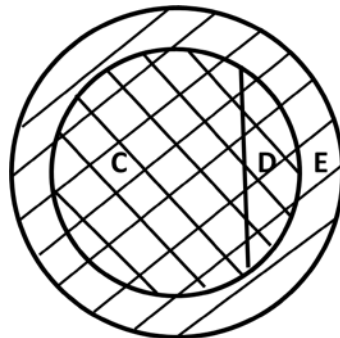


Рис. 2.3. Взаимное расположение множеств



- зона множества A ,



- зона множества B

Разность $A - B = E$ (зона E) определяет совокупность тех признаков, качественные и численные значения которых не оговариваются чертежом и ТУ. Следовательно, эти признаки по своему содержанию в определенной мере

произвольны.

Такой анализ позволяет выделить следующие основные направления обеспечения надежности при производстве:

1) конструктивно-технологическое формирование изделий, обеспечивающее взаимосвязь проектно-конструкторских и производственно-технологических решений;

2) обеспечение точности и стабильности на всех этапах производства, в том числе методами контроля качества и регулирования стабильности технологических процессов.

Рассматривая первое направление с учетом опыта проектирования и производства машин, отметим, что для обеспечения производства изделий с высоким уровнем надежности необходимо использовать метод конструктивно-технологического формирования. Сущность метода заключается в разработке конструктором совместно с технологом конструктивных схем, размеров деталей и выбора для их изготовления материалов и способов формирования заготовок и деталей, а также процессов сборки и испытания, таких, которые обеспечили бы выпуск изделий с заданными эксплуатационными свойствами.

Процесс конструктивно-технологического формирования должен осуществляться на базе широкого применения в конструкции стандартных элементов и деталей, а также стандартизации средств производства, способов формообразования заготовок, деталей, сборки и контроля изделий в процессе производства. В табл. 2.5 приведены сведения о параметрах, влияющих на эксплуатационные свойства изделий.

Значительная часть отказов ГТД связана с поломками высоконагруженных элементов конструкции, в частности, с разрушениями лопаток осевых компрессоров и турбин, во многих случаях определяемыми особенностями их изготовления. Анализ причин разрушения деталей ГТД, в первую очередь лопаток, показывает, что доминирующую роль играют разрушения вследствие недостаточной усталостной прочности, а турбинных лопаток - термоциклической стойкости. В значительной мере эти свойства зависят от технологии изготовления деталей. При литье на эти свойства можно влиять, добиваясь нужной структуры материала. Решающее влияние на прочность, безотказность и долговечность большинства высоконагруженных деталей оказывают характеристики поверхностного слоя (физико-химические свойства, микрогеометрия, остаточные напряжения), которые формируются под действием тех или иных процессов обработки поверхностей.

Под поверхностным слоем понимают ту небольшую периферическую зону материала детали, в которой физико-химические и механические свойства отличаются от свойств остальной массы детали. Эта зона может иметь глубину от сотых долей миллиметра до одного-двух миллиметров, но главное влияние на поведение детали оказывают слои, непосредственно прилегающие к поверхности. Качество поверхностного слоя формируется на всем протяжении технологического процесса. Эти качества меняются под влиянием различных операций, но последова-

тельное удаление при каждой из них слоев, сформировавшихся при предыдущих операциях, не полностью устраняет приобретенные при этом особенности.

Таблица 2.5

Параметры, влияющие на эксплуатационные свойства изделий

Параметры	Эксплуатационные свойства, на которые оказывает влияние параметр
Радиусы галтелей и округлений кромок	Сопротивление усталости, точность работы гидросистем
Отдельные допуски на зазоры	Точность и плавность работы изделий
Вид термообработки	Износостойкость, прочность
Величина поверхностных остаточных напряжений	Выносливость, износостойкость
Интенсивность и степень однородности наклепа	Износостойкость, магнитные свойства
Направление рисков-следов обработки	Сопротивление усталости, коэффициент трения
Допуски на погрешность формы и взаимное положение отдельных поверхностей	Виброустойчивость изделия в период приработки. Гидродинамические характеристики
Допустимая остаточная величина коробления деталей после обработки. Наличие остаточной намагниченности	Точность, повышенный износ, работоспособность и точность приборов
Чистота каналов и внутренних полостей	Безотказность гидросистем, износостойкость

Процессы упрочнения (наклепа) и образования остаточных напряжений в поверхностном слое, величина и характер микронеровностей поверхности определяются такими технологическими факторами, как величина припуска, геометрия инструмента, режим и кинематика процесса обработки. Но так как характеристика поверхностного слоя существенно влияет, например, на выносливость деталей, то она зависит, следовательно, от характера технологического процесса, под действием которого сформировался поверхностный слой. Это положение иллюстрируется материалами, представленными на рис. 2.4, где показано влияние технологии на усталостную прочность образца из жаропрочного сплава ХНЭОВМТЮ (ЭИ 617) при температуре 750°C. Из графиков видно, что при использовании технологических процессов, не дающих растягивающих остаточных напряжений, предел выносливости увеличивается. Максимальное значение σ_{-1} соответствует образцам, обработанным электрохимическим способом с последующим электрополированием, при которых не происходит ни пластических, ни упругих деформаций в поверхностном слое.

Влияние технологических процессов упрочняющей обработки деталей на эксплуатационные свойства деталей показано в табл. 2.6.

Переходя ко второму направлению обеспечения надежности, связанному с качеством изготовления, точностью и стабильностью технологических процессов, отметим, что оно способствует снижению брака (зона D, рис. 2.3) и воздействует на признаки изделия, не регламентированные чертежом и ТУ (зона E).

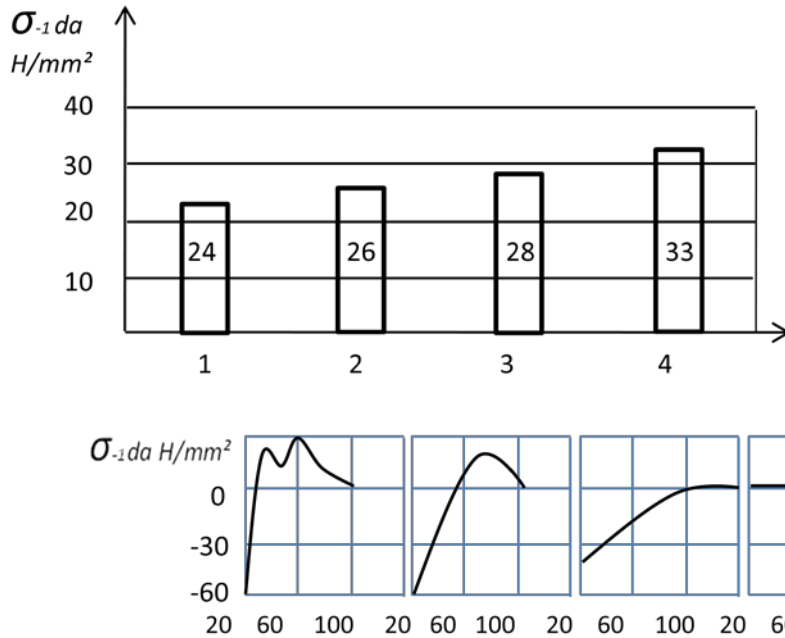


Рис. 2.4. Предел выносливости образцов из сплава Э11617 и распределение в них остаточных напряжений после фрезерования изношенной фрезой и декоративного полирования (1), шлифования и полирования войлочным кругом (2), после полирования с последующим отжигом (3), после электрохимической обработки и электрополирования (4).

Имеются в виду признаки, не установленные чертежом в связи с тем, что, по мнению конструктора, они либо не оказывают существенного влияния на работоспособность изделия, либо их трудно контролировать и осуществлять в производстве. Однако, как показывает опыт, часть из них оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства изделий. Применительно к обработке деталей особенно большое число неучтенных признаков относится к характеристикам поверхностного слоя.

Влияние точности и стабильности технологических процессов разнообразно; так, например, при небольшом разбросе частот собственных колебаний лопаток (из-за нестабильности их размеров и формы) на отдельных экземплярах двигателя могут возникнуть опасные резонансные колебания этих лопаток; нестабильность механических свойств материала заготовок дисков опасна недопустимым снижением

Таблица 2.6

Технологические процессы, способствующие повышению

Методы упрочняющей обработки деталей	Улучшение эксплуатационных свойств деталей
1	2
Литье лопаток турбины с мелкозернистой структурой	Повышаются пластичность на 40-50%, сопротивление термоциклической усталости в 1,5-2 раза, динамическая прочность на 20-25%
Литье лопаток турбины с направленной кристаллизацией	Повышается пластичность в 2-3 раза, термоциклическая стойкость в 1,5-2 раза, длительная прочность
Электрохимическая обработка лопаток	Повышается предел выносливости на 18-33%
Гидродробеструйное упрочнение лопаток компрессора с последующим виброшлифованием	Повышается усталостная прочность более чем на 30%
Вибрационная упрочняющая обработка: Виброгалтовка виброшлифование и виброполирование	Повышает выносливость на 25%, на класс улучшает шероховатость поверхности Обеспечивают шероховатость поверхности 7-8 класса
Упрочненные микрошариками: резьбы лопаток компрессора лопаток турбины елочные пазы дисков турбины хвостовых лопаток турбины	Повышается усталостная прочность на 50 % Повышается усталостная прочность на 12 % Повышается выносливость на 38% Повышается выносливость на 50% Повышается выносливость на 50%
Упрочнение обкаткой роликами елочных замков лопаток турбины	Повышается предел выносливости на 30 %
Алмазное выглаживание валов компрессоров, турбин	Повышается износостойкость и усталостная прочность, обеспечивается получение поверхности с шероховатостью 8 класса

запасов их прочности; отклонения в форме и размерах деталей, образующих проточную часть компрессора, ведут к снижению запасов газодинамической устойчивости и т.д. Очевидно, что обеспечение точности и стабильности производства оказывает серьезное влияние на надежность ГТД.

Методы контроля качества и регулирования стабильности технологических процессов производства авиационной техники, например ГТД, должны учитывать особенности двигателей как объектов производства. Среди них - сравнительно мелкие масштабы производства и большое количество геометрических параметров, обеспечиваемых методами неполной взаимозаменяемости. Эти особенности несколько ограничивают применение методов статистического контроля, статистического регулирования стабильности технологических процессов, широко используемых при массовом производстве.

Не рассматривая весь комплекс методов контроля качества и регулирования технологических процессов, выделим несколько важных для обеспечения надежности: входной контроль, технологические запасы, неразрушающий контроль, управление разбросом выходных данных.

Входной контроль призван не допустить применение некондиционных материалов, заготовок, готовых изделий, получаемых от поставщиков-смежников. Входной контроль не должен дублировать контроль на заводах-поставщиках, а должен быть направлен на выявление и контроль признаков качества, характерных для специальных условий применения изделий, например, сопоставление характеристик исходного материала и готовых деталей.

Технологические запасы призваны обеспечить гарантированное получение в процессе производства заданных значений конструктивных параметров. Достигаются технологические запасы назначением производственных допусков, меньших, чем конструктивные допуски и таким проектированием технологических процессов, при котором между возможным с учетом всех производственных погрешностей отклонений конструктивного параметра и его регламентированным значением оставался бы некоторый запас. Технологические запасы используются для ответственных деталей.

Неразрушающий контроль нашел широкое применение, например, для контроля лопаток, дисков. Для выявления поверхностных дефектов типа микротрещин (шириной 0,001 мм и глубиной 0,01 мм), пор, рыхлот и т.п. используют капиллярные методы (люминесцентный контроль). Для обнаружения раковин, рыхлот, неметаллических и шлаковых включений применяются радиационные методы контроля. Акустические методы контроля применяют для определения несплошностей, структурного анализа материала (например, размера зерен), измерения толщин при одностороннем допуске к деталям. Находят применение также магнитные и электромагнитные методы неразрушающего контроля. Использование неразрушающих методов контроля качества материала готовых изделий является важным фактором обеспечения надежности ГТД при производстве, позволяющим выявлять скрытые дефекты, снижающие работоспособность деталей.

Управление разбросом выездных данных двигателей, не допуская их выхода за пределы технических норм, возможно, во-первых, воздействием на допуски, устанавливаемые на конструктивные параметры узлов и деталей, определяющие разброс данного параметра. Вторым способом управления является ликвидация имеющегося недопустимого отклонения контролируемого выходного параметра перенастройкой характеристик какого-либо из элементов двигателя, т.е. компенсация опасного отклонения одного параметра допустимым отклонением другого параметра. Этот процесс называется отладкой двигателя, применяемые способы которой зависят от того, каким образом контролируется режим двигателя в эксплуатации. Если основным показателем режима является частота вращения ротора двигателя n , то при стендовой отладке должно быть обеспечено заданное протекание параметров по n . В этом случае отладка обеспечивается трудоемким подбором проходных сечений выходного сопла, сопловых аппаратов турбины. Важными факторами надежности двигателя являются стабильность производства и эффективность отладки двигателя.

К основным параметрам технологических процессов (ТП) изготовления изделий относят также параметры отдельных деталей и сборочных единиц, от которых существенно зависят эксплуатационные свойства изделия в целом и их надежность. К ним относятся:

качество исходных материалов и комплектующих изделий;

точность выполнения финишных и сборочных операций при изготовлении продукции;

использование методов и средств контроля качества продукции, регулирования стабильности ТП.

Выбор основных параметров технологических процессов, лимитирующих надежность конечной продукции (лимитирующих параметров ТП) производят для:

обоснования их допустимых значений, исходя из условия обеспечения требуемой надежности изделия;

корректировки системы контроля качества при изготовлении продукции;

проведения мероприятий по совершенствованию ТП;

уточнения требований к комплектующим изделиям и материалам;

получения дополнительной информации, используемой при составлении программ и методик испытаний на надежность.

Выбор минимизирующих параметров ТП производят по результатам анализа причин отказов (предельного состояния) изделий (рис. 2.5).

При этом в результате анализа причин отказов должны быть определены выходные параметры ТП изготовления отдельных деталей и сборочных единиц, нарушение которых потенциально может привести к потере работоспособного состояния.



Рис. 2.5. Схема выявления параметров технологических схем, влияющих на надежность изделий

2.4. Принципы ускоренных испытаний на надежность

Под испытанием понимается экспериментальное определение количественных и качественных характеристик свойств изделий как результат его

функционирования, воздействий или моделирования воздействий. Испытания по продолжительности подразделяются на нормальные и ускоренные. К нормальным относятся испытания, которые обеспечивают получение необходимого объема информации о показателях надежности изделий в такой же интервал времени, как и в ожидаемых условиях эксплуатации. К ускоренным относятся такие испытания, методы и условия проведения которых обеспечивает получение необходимой информации в более короткий срок, чем при нормальных условиях.

Ускорение испытания могут проводиться в нормальном, форсированном или комбинированном режимах. Ускорение испытаний в форсированном режиме (форсированные испытания) достигается интенсификацией деградационных процессов, приводящих к отказам или повреждениям.

Ускоренные испытания без интенсификации процессов, приводящих к отказам или повреждениям, называются сокращенными.

Сокращение продолжительности испытаний при ускоренных испытаниях характеризуется коэффициентом ускорения, показывающим во сколько раз продолжительность ускоренных испытаний меньше продолжительности нормальных испытаний.

Совокупность теоретических и экспериментальных закономерностей или обоснованных допущений, на основе которых достигается сокращение продолжительности испытаний, называется принципом ускоренных испытаний.

Сокращенные испытания строятся на основе принципов уплотнения рабочих циклов или экстраполяции по времени (наработке). Уплотнение рабочих циклов достигается сокращением перерывов в работе и устранением простоев, сокращением времени на вспомогательные работы, холостые пробеги и т.п. Экстраполяцию по времени (наработке) осуществляют на основе модели надежности (отказов). Нарботку до отказов оценивают по результатам кратковременных (усеченных) испытаний. Различают модели отказов, основанных на изучении закономерностей изменения выходных параметров или статистики отказов.

При использовании принципов сокращенных испытаний последние проводятся в нормальных режимах или максимально приближенных к ним. При этом соблюдается эквивалентность при сокращенных испытаниях и в условиях эксплуатации.

Принципы форсированных испытаний по способу пересчета их результатов на условия нормального режима подразделяются на две группы:

с пересчетом по известному до испытаний численному значению коэффициента ускорения;

с оценкой показателей надежности без предварительного определения коэффициента ускорения для заданного режима форсированных испытаний.

К первой группе относятся принципы усечения спектра нагрузок, учащения рабочих циклов, сравнения, ко второй - принципы экстраполяции по нагрузке, доламывания, запросов и др.

Совокупность правил применения принципов ускоренных испытаний для

определения или контроля показателей надежности изделий образует метод ускоренных испытаний.

Усечение спектра нагрузок заключается в исключении части нагрузок, не оказывающих существенного повреждающего воздействия на объект испытаний, что приводит к повышению среднего уровня нагрузок и, следовательно, к более быстрому наступлению отказа или предельного состояния.

Принцип учащения рабочих циклов основан на увеличении частоты циклического нагружения или скорости движения под нагрузкой. Его применение допустимо, когда долговечность изделия, выраженная в количестве циклов, зависит от количества циклов воздействия, но не зависит от частоты их приложения или когда скорость скольжения не изменяет природу изнашивания поверхностей.

Принцип сравнения основан на использовании данных об аналогичных изделиях.

К группе принципов сформированных испытаний, не требующих предварительного определения коэффициента пересчета, относят экстраполяцию по нагрузке, принцип "доламывания" и принцип запросов. Примерами принципа экстраполяции по нагрузке служат ускоренные методы оценки предела выносливости. При использовании принципа "доламывания" изделия, имеющие различную наработку в нормальном режиме, доводят затем до отказа в форсированном режиме ("доламывают"). Одновременно с этим по результатам только на форсированном режиме определяют показатели надежности новых изделий на этом режиме. На основании этих данных определяют показатели надежности применительно к нормальным режимам эксплуатации. Этот принцип используется при испытании для дорогостоящих изделий.

Принцип запросов применяется в тех случаях, когда возможно измерение параметра, выход которого за допустимые пределы означает отказ. В ходе испытаний нормальные и форсированные режимы нагружения чередуются.

При использовании принципа уплотнения рабочих циклов коэффициент ускорения

$$K_y = \frac{M(C_{N,N})}{M(C_{N,N}^1)},$$

где $M(C_{N,N})$, $M(C_{N,N}^1)$ - матожидание срока службы N-ого объекта в выборке объема N (упорядоченной по возрастанию) соответственно при нормальных и ускоренных испытаниях.

Коэффициент пересчета показателей надежности, полученных при ускоренных испытаниях, показатели надежности для нормальных режимов, выраженные в единицах календарной продолжительности, определяют по методу равных вероятностей (рис. 2.6).

На стадии предварительных исследования берут две случайные выборки из одной и той же партии изделий. Одна из них испытывается в нормальных условиях, другая - в режиме ускоренных испытаний. В процессе испытаний

фиксируются моменты отказа изделий. По полученным экспериментальным данным находится функция $K_{вр}$ (рис. 2.6) как геометрическое место точек, соответствующих равным вероятностям P достижения предельного состояния.

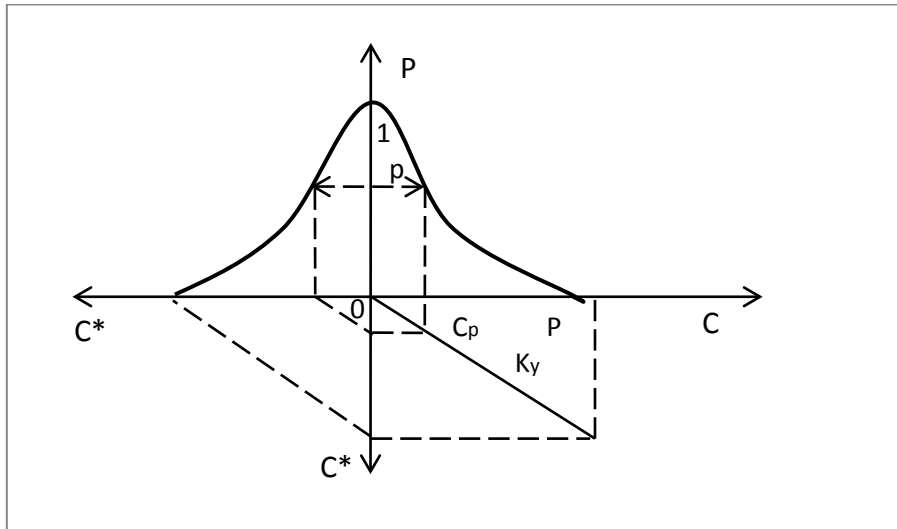


Рис. 2.6. Схема пересчета показателей надежности по методу равных вероятностей:

C, C^* - срок службы при нормальных и ускоренных испытаниях, P - вероятность не достижения предельного состояния

Для этого задается ряд значений вероятности P и определяются соответствующие им пары C_p и C_{p^*} , которые являются коэффициентами точек искомой функции $K_{ур}$. Результаты ускоренных испытаний любой другой выборки пересчитывают к нормальным условиям с определением коэффициента ускорения по кривой $K_{вр}$. Если показатели надежности при ускоренных испытаниях и в эксплуатации подсчитываются в единицах наработки, то коэффициент пересчета равен единице.

Принцип экстраполяции по времени (наработке) основан на гипотезе о возможности достаточно достоверного прогнозирования надежности изделия по результатам усеченных или кратковременных испытаний. Прогнозирование может осуществляться на основе изучения закономерностей изменения выходных параметров, определяющих работоспособное состояние и статистических данных об отказах.

Параметрическая модель отказов представлена на рис. 2.7. Вероятность отказа $F(t)$ характеризует вероятность выхода параметра x за установленную границу. В начальный момент $t=0$ плотность распределения параметра x определяется функцией $f(x_0)$. В большинстве случаев существенное изменение параметра x начинается после некоторой наработки t_b и протекает со случайной скоростью $V_1=dx/dt$. В момент усечения испытаний t_y , плотность распределения

значений выходного параметра $f(x, t)$, который определяет вероятность выхода параметра за границу x_{\max} , т.е. вероятность отказа $F(t)$.

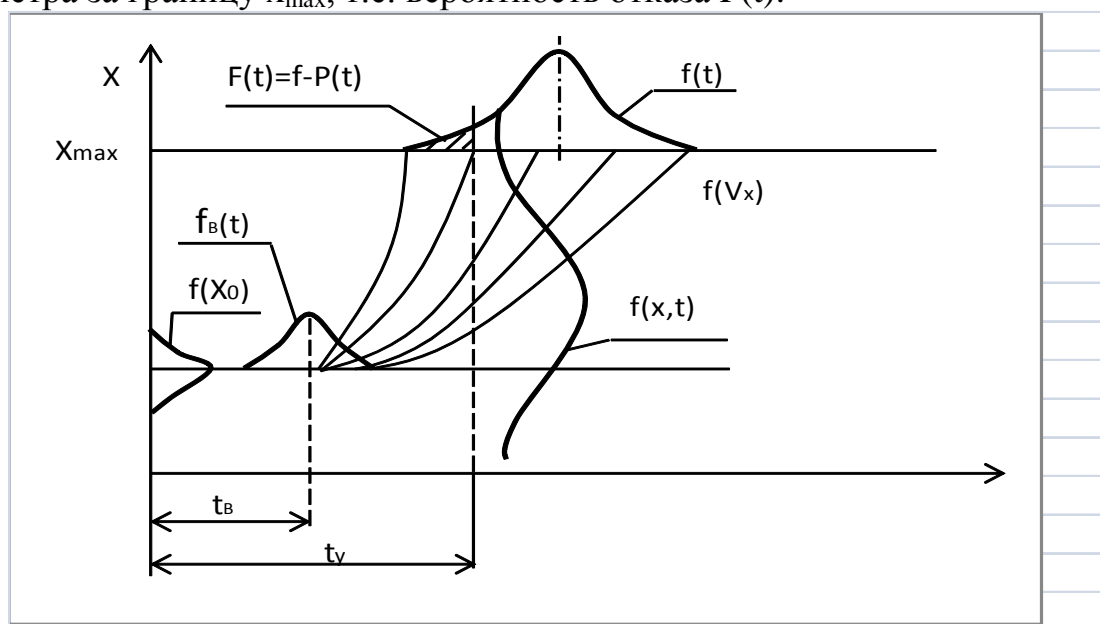


Рис. 2.7. Параметрическая модель отказов

Цензурированная (усеченная) модель отказов основана на регистрации отказов до момента усечения испытаний, что приводит к получению выборки, представляющей собой наработки N объектов испытаний как отказавших, так и оставшихся работоспособными. Различают два вида цензурирования (усечения): прекращение испытаний при заданной наработке T (план испытаний $[N U T]$) и при заданном x_{\max} – предельно допустимое значение выходного параметра; $f(x_0)$ $f(x_0)$ – плотность распределения выходного параметра в начале испытаний; t_B – начало старения (изнашивания); $f(t)$ – плотность распределения наработок до отказа; $F(t) = 1 - P(t)$ – вероятность отказа, $f(x, t)$ – плотность распределения выходного параметра, $f(v_x)$ – плотность распределения скорости изменения выходного параметра, t – наработка, t_v – наработка на момент усечения испытаний.

Количестве отказов r (план испытаний $(N U r)$). При использовании принципа экстраполяции по времени (наработке) коэффициент ускорения

$$K_y \begin{cases} M(C_{NN}/C_y) & \text{– при усечении испытаний по наработке} \\ M(C_{NN}/M(C_{r,N})) & \text{– при усечении испытаний по количеству отказов} \end{cases}$$

где $M(C_{NN}), M(C_{r,N})$ – математическое ожидание продолжительности испытания, соответствующие наработкам $t_{N,N}, t_{r,N}$ последнего и r -ого объекта упорядоченной (по возрастанию наработки) выборке объема N ; C_y – продолжительность испытаний, соответствующая наработке t_y на момент усечения испытаний.

Если показатель надежности подсчитывают в эксплуатации по календарному времени, а при испытаниях по наработке, то коэффициент пересчета определяют по методу равных вероятностей (рис. 2.6).

Можно считать, что экстраполяция по наработке дает удовлетворительные результаты по точности при продолжительности испытаний не менее 40-70% ресурса изделий при нормальных испытаниях.

3. КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

3.1. Статистический контроль показателей надежности

В последние годы уделяется большое внимание стандартизации методов и планов статистического контроля показателей надежности изделий (ГОСТ Р 27.411-2009).

В стандартах рассматриваются одноступенчатые и последовательные планы контроля показателей надежности по альтернативному признаку. План контроля содержит число испытываемых изделий (объем выборки) N , стратегию проведения испытаний (с восстановлением или заменой отказавших изделий, без восстановления или замены отказавших изделий), правило прекращения наблюдений (ожидаемая суммарная наработка t или число отказов r до принятия решения), число независимых наблюдений n и отказов r , позволяющих принять решение о соответствии или несоответствии изделий заданным требованиям к уровню надежности, а также правила принятия решения.

Альтернативный признак исходит из классификации изделий парка (партии) на годные и негодные относительно заданных требований. Планы контроля построены применительно к следующим показателям надежности: вероятности безотказной работы $P(t)$, средней наработки на отказ T , числу отказавших изделий в партии (ГОСТ Р 27.411-2009).

Цель контроля показателей надежности (контрольной процедуры) установить, соответствует ли изделие заданным требованиям. Результатом контроля является решение о соответствии или несоответствии изделия требованиям (приемка или браковка изделия).

Рассмотрим случай, когда *показатель надежности R возрастает с повышением надежности (например, $P(t)$ или T)*. Если в технической документации установлено требуемое значение показателя надежности $R_{тр}$, то при разработке контрольной процедуры стремятся обеспечить приемку изделий с уровнем надежности $R \leq R_{тр}$ и браковку изделий с уровнем надежности $R_{тр}$.

Зависимость вероятности приемки изделия L от его надежности R называется *оперативной характеристикой надежности* (рис. 3.1). Идеальная оперативная характеристика (жирная линия) практически недостижима, так как требует

бесконечного объема наблюдений. Реальная оперативная характеристика $L(R)$ изображена тонкой линией. Вводят два уровня контролируемого показателя надежности: приемочный R_α и браковочный R_β и устанавливают значения $L(R)$ в этих точках $1 - \alpha$ и β , соответственно. При этом считается, что изделия с уровнем надежности $R \geq R_\alpha$ безусловно приемлемы для потребителя и должны приниматься с достаточно высокой вероятностью не ниже $L(R_\alpha)$, а изделия с уровнем $R \leq R_\beta$ неприемлемы и должны с высокой вероятностью (не ниже $1 - L(R_\beta)$) браковаться. Вероятности противоположных событий $\alpha = 1 - L(R_\alpha)$ и $\beta = L(R_\beta)$, т.е. вероятностями ошибочных выводов принято характеризовать степень уверенности контролеров в правильности принимаемых решений.

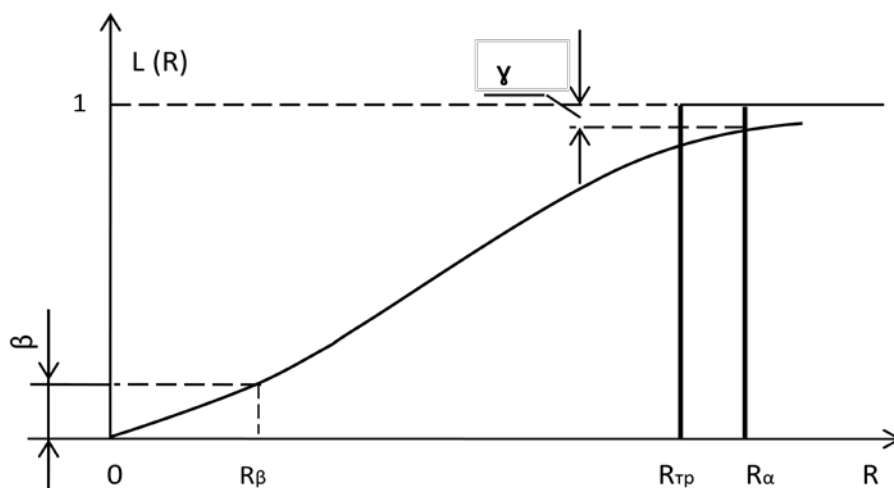


Рис. 3.1. Оперативная характеристика

Как видно из рис. 3.1, величины α и β характеризуют максимально возможные вероятности ошибок в областях $R \geq R_\alpha$ и $R \leq R_\beta$ соответственно. Это позволяет проверку сложных гипотез $R \geq R_\alpha$ и $R \leq R_\beta$ заменить проверкой простых гипотез $R = R_\alpha$ и $R = R_\beta$. Контроль, обеспечивающий заданные риски в этих точках, обеспечит такие же и меньшие риски в областях $R \geq R_\alpha$ и $R < R_\beta$.

Четыре числа R_α , R_β , α , β определяют две точки оперативной характеристики, что при выбранной процедуре контроля (одноступенчатая, последовательная), в свою очередь, определяет план контроля включая объем наблюдений N . Объем наблюдений N является единственным ограничением, не позволяющим произвольно уменьшать риски и сближать приемочный и браковочный уровни. Поэтому при планировании контроля следует выбирать R_α , R_β , α , β таким образом, чтобы использовать имеющиеся возможности. На разных этапах жизненного цикла (проектирования, производства, эксплуатации) изделий эти возможности различны, поэтому указанные параметры целесообразно выбирать на стадии разработки программы контроля надежности для соответствующего этапа.

Размещение интервала $[R_\alpha, R_\beta]$ относительно заданного значения $R_{тр}$ при $\alpha=\beta$ должно выбираться с учетом от ущерба, наносимого потребителю приемкой плохих изделий и поставщику браковкой хороших. Если ущерб потребителя сопоставим с ущербом поставщика, интервал $[R_\alpha, R_\beta]$ размещается симметрично около $R_{тр}$ так, чтобы $L(R_{тр}) = 0,5$. Если ущерб потребителя невелик по сравнению с ущербом поставщика, интервал $[R_1, R_0]$ смещается влево вплоть до крайнего положения, когда $R_\alpha=R_{тр}$. При обратном соотношении (ущерб поставщика невелик по сравнению с ущербом потребителя) интервал смещается вправо (крайнее положение $R_1=R_{тр}$). В принципе, координаты R_β , β и R_α , α выбираются как точки равного ущерба (для поставщика и потребителя).

Принятые для планирования риски α и β характеризуют только план контроля, поэтому после контроля вместо них следует использовать так называемые наблюдаемые риски:

после браковки наблюдаемый риск поставщика $\hat{\alpha}$ - вероятность результата, который не лучше реально полученного \hat{R} , при условии $R = R_\alpha$;

после приемки наблюдаемый риск потребителя $\hat{\beta}$ - вероятность результата, который не хуже реального \hat{R} при условии $R = R_\beta$.

Отметим, что те и другие риски являются условными вероятностями - при условии $R = R_\alpha$ или $R = R_\beta$. Поскольку α и β относятся к гипотетическому наихудшему результату наблюдений, а $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ - к реальному, имеют место соотношения $\hat{\alpha} \leq \alpha$ и $\hat{\beta} \leq \beta$.

На рис. 3.1 области значений $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ обозначен двойной штриховой линией.

Рассмотрим *одноступенчатый контроль показателей надежности типа наработки* для случая экспоненциального распределения наработки между отказами. Продолжительность контроля ограничена некоторым предельным временем (наработкой). При выборе плана контроля абсолютные значения уровней $R_\alpha = T_\alpha$ и $R_\beta = T_\beta$ являются несущественными, план определяется их отношением R_α/T_β и рисками α и β . Для упрощения контрольной процедуры приемку (браковку) изделий принято проводить не по уровню контролируемого показателя надежности, а по связанному с ним числу возникших отказов.

В процессе контроля наработки на отказ фиксируется суммарное по всем N контролируемых образцов изделия число отказов r , а также суммарная наработка

$$t_\epsilon = \sum_{i=1}^N t_{Hi} ,$$

где t_{Hi} - наработка i -го образца.

План контроля представляет собой пару чисел: браковочное число отказов $r_{бр}$ и предельную суммарную наработку t_{max} . Контроль прекращается как только будет достигнуто одно из этих значений.

Если первым достигается $r = r_{\text{бр}}$ при $t_{\epsilon} < t_{\text{max}}$, то изделие бракуется; если первым достигается $t_{\epsilon} = t_{\text{max}}$ при $r < r_{\text{бр}}$ изделие принимается. План выбирается в соответствии с таблицей (ГОСТ 27.410-83). Поскольку число отказов дискретно, при заданных значениях α и β и отношение T_{α}/T_{β} соответствующее точному решению задачи, также принимает дискретные значения. Отношение T_{α}/T_{β} определено для каждой пары значений α и β и для 18 значений $r_{\text{бр}}$ по формуле

$$\frac{T_{\alpha}}{T_{\beta}} = \frac{\chi_{1-\beta, 2r_{\text{бр}}}^2}{\chi_{\alpha, 2r_{\text{бр}}}^2},$$

где $\chi_{1-\beta, 2r_{\text{бр}}}^2$ и $\chi_{\alpha, 2r_{\text{бр}}}^2$ - квантили уровней $1 - \beta$ и α χ^2 - распределения с $2r_{\text{бр}}$ степенями свободы.

Величина $t_{\text{max}}/T_{\alpha}$ вычислена по формуле

$$\frac{t_{\text{max}}}{T_{\alpha}} = \frac{1}{2\chi_{\alpha, 2r_{\text{бр}}}^2}.$$

Оперативная характеристика любого из приведенных в таблице планов может быть построена по формуле

$$L(T) = \sum_{r=1}^{r_{\text{бр}}-1} \frac{\left(\frac{t_{\text{max}}}{T}\right)^r e^{-t_{\text{max}}/T}}{r!}.$$

Общую продолжительность контроля можно изменить в широких пределах за счет пропорционального изменения числа контролируемых образцов с единственным условием: обеспечить требуемую суммарную наработку t_{max} . Если предельная продолжительность контроля $t_{\text{пред}}$ задана, все образцы работают одновременно, а отказавшие заменяются (или полностью восстанавливаются), то необходимое число образцов можно определить по формуле

$$N = \frac{t_{\text{max}}}{t_{\text{пред}}}.$$

Если отказавшие изделия не заменяются и не восстанавливаются, число образцов для достижения той же суммарной наработки при той же общей продолжительности контроля следует увеличить, чтобы суммарная наработка добавочных образцов ΔN компенсировала потери наработки отказавших. В среднем $\Delta N = t_{\text{max}}/T$, где T - ожидаемое реальное значение показателя надежности изделия. Во всяком случае ΔN не превышает $r_{\text{бр}} - 1$.

Иногда используется вариант контроля, продолжительность которого ограничена заранее вычисленным числом отказов $r_{\text{пред}}$ планы: $[N \ U \ r]$, $[N \ R \ r]$, $[N \ M \ r]$. По достижении этого числа отказов подсчитывается суммарная наработка контролируемых образцов t_{ϵ} и определяется точечная оценка наработки на отказ $\hat{T} = t_{\epsilon}/r_{\text{пред}}$. Если \hat{T} не менее оценочного норматива c , изделие принимается, если менее - бракуется. Очевидно, что после достижения наработки $t_{\epsilon} = c r_{\text{пред}}$ продолжать контроль не имеет смысла - приемка гарантируется.

Таким образом, контроль следует продолжать либо до заданного числа отказов

$r_{\text{пред}}$, если $t_{\epsilon} < c r_{\text{пред}}$ (при этом изделие бракуется), либо до указанной наработки $t_{\epsilon} = c r_{\text{пред}}$, если $r < r_{\text{пред}}$, (при этом изделие принимается). Это соответствует планам $[N R r_{\text{пред}} t_{\epsilon}]$, $[N M r_{\text{пред}} t_{\epsilon}]$ или плану $[N U r_{\text{пред}} t_{\epsilon}]$ и полностью эквивалентно контролю, описанному выше. В стандарте (ГОСТ Р 27.403-2009) предусмотрены случаи планирования наблюдений, когда распределение наработки до отказа (между отказами) или до предельного состояния описывается одним из следующих законов: экспоненциальным, Вейбулла, усеченным нормальным и логарифмически нормальным.

Одноступенчатый контроль показателей надежности типа вероятности производится следующим образом. Если показатель надежности представляет собой вероятность некоторого события A , то организуется N независимых опытов по осуществлению этого события и в каждом опыте (наблюдении) фиксируется результат: успех, если событие A имело место, и неуспех (отказ) в противном случае. Например, при контроле $P(t)$ в каждом опыте фиксируется, проработало ли изделие безотказно время t . После N -го опыта изделие принимается, если суммарное число отказов не больше заранее вычисленного оценочного норматива $r_{\text{бр}}$, и бракуется в противном случае. опыты могут проводиться как на одном, так и на нескольких (до N) образцах изделий при условии, что независимость опытов обеспечена либо за счет полного восстановления образца к началу очередного опыта, либо за счет разнесения опытов по времени или по образцам. Таким образом, план контроля представляет собой пару чисел $N, r_{\text{бр}}$.

План определяется по заданным $P_{\alpha}, P_{\beta}, \alpha$ и β с помощью таблиц (ГОСТ Р 27.403-2009). Значения N и $r_{\text{бр}}$, приведенные в таблицах, определены решением системы уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{r_{\text{бр}}-1} C_N^i P_{\alpha}^{N-i} (1 - P_{\alpha})^i &= 1 - \alpha, \\ \sum_{i=0}^{r_{\text{бр}}-1} C_N^i P_{\beta}^{N-i} (1 - P_{\beta})^i &= \beta, \end{aligned}$$

где C_N^i - число сочетаний i из N .

Число образцов изделий находится исходя из требования независимости всех N опытов. При контроле показателей типа вероятности знание закона распределения наработки до отказа (между отказами) или до предельного состояния не обязательно.

При неизвестном законе распределения наработки до отказа (между отказами) продолжительность наблюдения равна наработке, для которой задана вероятность безотказной работы, т.е. $P(t) = P(t_H)$.

При известном законе распределения наработки до отказа (между отказами) пересчет заданных приемочного и браковочного уровней вероятности безотказной работы на уровни, обеспечивающие продолжительности наблюдения, производят с помощью аналитических зависимостей, описывающих известные распределения.

Для экспоненциального распределения:

$$P_{\alpha}(t_H) = e^{-\frac{t_H}{t} \ln P_{\alpha}(t)}, \quad P_{\beta}(t_H) = e^{-\frac{t_H}{t} \ln P_{\beta}(t)}$$

Для распределения Вейбулла:

$$P_{\alpha}(t_H) = e^{\left(\frac{t_H}{t}\right)^b \ln P_{\alpha}(t)}, \quad P_{\beta}(t_H) = e^{\left(\frac{t_H}{t}\right)^b \ln P_{\beta}(t)},$$

Для нормального распределения:

$$P_{\alpha}(t_H) = F_0\left(U_{t_{\alpha}} + \frac{t-t_H}{\sigma}\right); \quad P_{\beta}(t_H) = F_0\left(U_{t_{\beta}} + \frac{t-t_H}{\sigma}\right),$$

где U_t – квантиль нормированного и центрированного нормального распределения, отвечающий вероятности $P(t)$, т.е.

$$F_0(U_{t_{\alpha}}) = P_{\alpha}(t), \quad F_0(U_{t_{\beta}}) = P_{\beta}(t)$$

При последовательном контроле показателей надежности строятся зоны приемки и браков. Продолжительность последовательного контроля случайна, поэтому требуемый объем наблюдений может превысить объем испытаний, достаточный для одноступенчатого контроля. В связи с этим используют усечение последовательного контроля. Однако это приводит к некоторому возрастанию рисков α и β .

Рассмотрим последовательный контроль показателей типа наработка для случая экспоненциального распределения. В процессе контроля фиксируются суммарная наработка t_{ϵ} всем наблюдаемым образцам и суммарное число отказов. Приемка и браковка производится на основании числа отказов. Изделия могут восстанавливаться (заменяться) или не восстанавливаться. Планирование (рис. 3.2) состоит в построении двух границ областей приемки и браковки в системе координат "наработка t_{ϵ}/T_{α} - число отказов r ".

Положение этих границ в указанных координатах не зависит от абсолютных значений T_{α} и T_{β} , а определяется их отношением. В ходе контроля на рис. 3.2 с заранее проведенными границами строится ступенчатый график числа отказов как функция суммарной наработки. В момент каждого очередного отказа принимается одно из решений:

приемка, если функция $r(t_{\epsilon})$ находится в области приемки;

браковка, если функция $r(t_{\epsilon})$ находится в области браковки;

продолжение наблюдений, если функция $r(t_{\epsilon})$ находится в промежуточной области.

Границы областей приемки и браковки представляют собой две бесконечные параллельные прямые линии. Для усечения контроля ограничивают число отказов и суммарную наработку значениями r_{yc} и t_{yc} , причем при достижении r_{yc} при $r_{yc} < t_{yc}$ - изделие бракуется, а по достижении t_{yc} при $r < r_{yc}$ - изделие принимается. Рекомендуется для практики усечения на уровне $r_{yc} = (1,5-2,5) r_{бр}$. Таким образом, с учетом усечения границы областей приемки и браковки представляют собой ломаные линии, состоящие каждая из двух отрезков (рис.3.2)

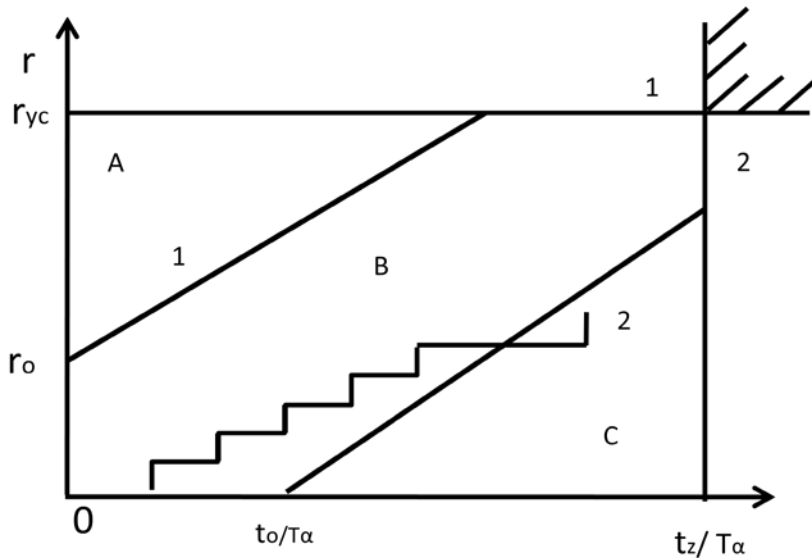


Рис. 3.2. График последовательного контроля показателя надежности типа Т
 1- линия несоответствия (браковки);
 2- линия соответствия (приемки);
 А - область несоответствия (браковки);
 В - область продолжения наблюдений;
 С - область соответствия (приемки).

Уравнения наклонных прямых, являющихся границами браковки и приемки (рис. 3.2) соответственно

$$r = a \frac{t}{T_\alpha} + r_0,$$

$$r = a \left(\frac{t}{T_\alpha} - \frac{t_0}{T_\alpha} \right),$$

где r_0 и t_0/T_α — точки пересечения прямых с осями координат.

Численные значения a , r_0 и t_0/T_α определяются по таблице стандарта (ГОСТ 27.410-83) как функции заданных значений α , β и T_α/T_β . В таблице приведены константы как для значений T_α/T_β соответствующих точным решениям задачи одноступенчатого контроля, так и для округленных значений.

Константы вычисляются по формулам

$$a = \frac{\frac{T_\alpha}{T_\beta} - 1}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}},$$

$$r_0 = \frac{\ln[(1-\beta)/\alpha]}{\ln T_\alpha/T_\beta},$$

$$\frac{t_0}{T_\alpha} = - \frac{\ln[\beta/(1-\alpha)]}{\frac{T_\alpha}{T_\beta} - 1}.$$

Уровень усечения последовательного контроля следует выбирать, учитывая, с одной стороны, организационно-технические возможности, а с другой - связанное с

усечением возрастание рисков α и β

Возрастание рисков α и β тем меньше, чем дальше (по наработке и числу отказов) проводится усечение.

Планы последовательного контроля показателей типа наработки при распределении Вейбулла (испытания без восстановления) и усеченном нормальном распределении проведены в стандарте (ГОСТ Р 27.403-2009).

Рассмотрим последовательный контроль показателей надежности типа вероятности. Если показатель надежности представляет собой вероятность некоторого события A , то контроль этого показателя $P(A)$ организуется в виде ряда опытов по осуществлению этого события. В каждом опыте фиксируется результат: успех, если событие A имело место, и неуспех (отказ) в противном случае. После каждого опыта на основе общего числа опытов N и числа зафиксированных отказов r проверяется выполнение условия приемки, браковки, или продолжения наблюдений с помощью графика, аналогичного представленному на рис. 3.2, но в координатах N, r (рис. 3.3). Контроль прекращается, как только ступенчатая функция $r(N)$ пересечет границы области приемки или браковки.

Законы распределения случайных величин, определяющих контролируемый параметр, не имеют значения, поскольку независимо от них оценка имеет биномиальное распределение. Контроль может проводиться как на одном, так и на нескольких образцах изделия при условии независимости опытов.

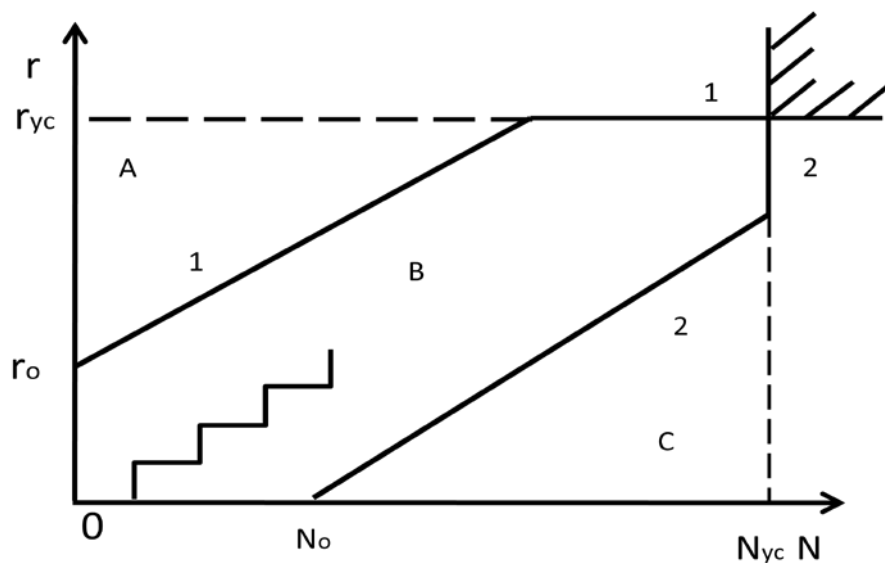


Рис. 3.3. График последовательного контроля показателя надежности типа P

- 1- линия несоответствия (брака);
- 2- линия соответствия (приемки);
- A - область несоответствия (брака);
- B - область продолжения наблюдений;
- C - область соответствия (приемки).

Уравнения наклонных прямых для границ браковки и приемки, соответственно, имеют вид:

$$\begin{aligned} R &= aN + r_0, \\ R &= a(N - N_0), \end{aligned}$$

где r_0 и N_0 – точки пересечения прямых с осями координат (рис. 3.3). Константы r_0 , N_0 вычисляются по формулам:

$$a = \frac{\ln \frac{P_\alpha}{P_\beta}}{\ln \frac{1-P_\beta}{1-P_\alpha} + \ln \frac{P_\alpha}{P_\beta}}, r_0 = \frac{\ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \frac{1-P_\beta}{1-P_\alpha} + \ln \frac{P_\alpha}{P_\beta}}, N = \frac{\ln \frac{1-\alpha}{\beta}}{\ln \frac{P_\alpha}{P_\beta}}.$$

Если $\alpha = \beta$, то $r_0 = a N_0$ и уравнения прямых имеют вид $r = aN \pm r_0$.

Средняя продолжительность контроля (среднее число опытов N) при $P = P_\alpha$ определяется по формуле

$$\bar{N} = \frac{(1-\alpha) \ln \frac{1-\alpha}{\beta} - \alpha \ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{P_\alpha \ln \left(\frac{P_\alpha}{P_\beta} \right) - (1-P_\alpha) \ln (1-P_\beta) / (1-P_\alpha)}.$$

Отметим, что наклон прямых a зависит от P_α и P_β и не зависит от рисков.

Значения a , r_0 , N_0 и \bar{N} приведены в таблицах стандарта (ГОСТ Р 27.403-2009).

Оперативная характеристика вычисляется по формуле

$$L(1-P) = \frac{1 - \left(\frac{1-\beta}{\alpha} \right)^{h(P)}}{\left(\frac{\beta}{1-\alpha} \right)^{h(P)} - \left(\frac{1-\beta}{\alpha} \right)^{h(P)}},$$

где функция $h(P)$ определяется уравнением

$$\frac{\left(\left(\frac{1-P_\beta}{1-P_\alpha} \right)^h - 1 \right)}{\left(\left(\frac{1-P_\beta}{1-P_\alpha} \right)^h - \left(\frac{P_\beta}{P_\alpha} \right)^h \right)} = P.$$

Усечение контроля можно принять на уровне $r_{yc} = (2-3) r_{бр3} r_{бр}$

3.2. Индивидуальный контроль норм надежности авиационной техники при эксплуатации

Контроль норм надежности производится по результатам эксплуатации конкретного экземпляра ЛА за календарный год. Результатами контроля являются оценки нормируемых показателей надежности и значения наблюдаемых рисков поставщика и заказчика. Оценки нормируемых показателей надежности ЛА могут использоваться для финансовых расчетов поставщика и заказчика. Наблюдаемые риски поставщика и заказчика используются для прогнозирования результатов дальнейшей эксплуатации ЛА или для принятия решения о расследовании причин неудовлетворительных результатов эксплуатации.

Исходными данными для проведения контроля норм надежности при

эксплуатации являются указанные в нормативно-технической документации нормы надежности; абсолютная (суммарная) оценка нормируемого показателя надежности, полученная по результатам эксплуатации Z_{ϵ} ; суммарная наработка ЛА за календарный год T_{ϵ} .

Нормы надежности могут быть заданы в виде значений удельного показателя θ^* или в виде значений абсолютного (суммарного) показателя θ_{ϵ}^* . Дополнительно могут быть заданы приемочный и браковочный уровни в виде отрезка $[\theta_{\text{пр}}, \theta_{\text{бр}}]$ или $[\theta_{\epsilon}^{\text{пр}}, \theta_{\epsilon}^{\text{бр}}]$.

В этом случае условно принимается, что ЛА соответствует норме надежности $\theta^*(\theta_{\epsilon}^*)$ по показателю $\theta(\theta_{\epsilon})$, т.е. $\theta = \theta^*(\theta_{\epsilon} = \theta_{\epsilon}^*)$, если $\theta_{\text{пр}} \leq \theta \leq \theta_{\text{бр}}$ ($\theta_{\epsilon}^{\text{пр}} \leq Z_{\epsilon} \leq \theta_{\epsilon}^{\text{бр}}$).

Величина отрезка между приемочным и браковочным уровнями означает тот минимальный разброс оценок нормируемого показателя надежности, за пределами которого может наступить финансовая ответственность.

Оценками нормируемых показателей надежности, получаемыми по результатам эксплуатации ЛА за календарный год являются следующие величины:

$$\theta = \frac{Z_{\epsilon}}{T_{\epsilon}}, \quad (3.1)$$

если задана норма на удельный показатель

$$\hat{\theta} = \begin{cases} \frac{Z_{\epsilon}}{T_{\epsilon}} & \text{при } \frac{Z_{\epsilon}}{T_{\epsilon}} > \theta_{\text{бр}} \text{ или } \frac{Z_{\epsilon}}{T_{\epsilon}} < \theta_{\text{пр}} \\ \theta^* & \text{при } \theta_{\text{пр}} \leq \frac{Z_{\epsilon}}{T_{\epsilon}} \leq \theta_{\text{бр}} \end{cases}, \quad (3.2)$$

если задана норма на удельный показатель, браковочный и приемочный уровни,

$$\hat{\theta} = Z_{\epsilon}, \quad (3.3)$$

если задана норма на абсолютный (суммарный) показатель:

$$\hat{\theta}_{\epsilon} = \begin{cases} Z_{\epsilon} & \text{при } Z_{\epsilon} > \theta_{\epsilon}^{\text{бр}} \text{ или } Z_{\epsilon} < \theta_{\epsilon}^{\text{пр}} \\ \theta_{\epsilon} & \text{при } \theta_{\epsilon}^{\text{пр}} \leq Z_{\epsilon} \leq \theta_{\epsilon}^{\text{бр}} \end{cases}, \quad (3.4)$$

если задана норма на абсолютный (суммарный) показатель, браковочный и приемочный уровни.

Расчет наблюдаемого риска поставщика или заказчика, производится на основе метода доверительных интервалов.

Наблюдаемый риск поставщика или заказчика по данным оценки (3.1-3.4) определяется для следующих случаев:

задана норма на удельный показатель (3.1)

$$\hat{\alpha} = 1 - F_0 \left(\frac{\hat{\theta} - \theta^*}{\hat{\theta} \sqrt{\frac{2}{T_{\epsilon} \hat{\Omega}_{\epsilon}}}} \right), \text{ если } \hat{\theta} \geq \theta^*,$$

$$\hat{\beta} = 1 - F_0 \left(\frac{\theta^* - \hat{\theta}}{\hat{\theta} \sqrt{\frac{2}{T_{\epsilon} \hat{\Omega}_{\epsilon}}}} \right), \text{ если } \hat{\theta} \leq \theta^*,$$

задана норма на удельный показатель, браковочный и приемочный уровни (3.2)

$$\hat{\alpha} = 1 - F_0 \left(\frac{\hat{\theta} - \theta_{\text{пр}}}{\hat{\theta} \sqrt{\frac{2}{T_{\epsilon} \hat{\Omega}_{\epsilon}}}} \right), \text{ если } Z_{\epsilon} / T_{\epsilon} > \theta_{\text{пр}},$$

$$\hat{\beta} = 1 - F_0 \left(\frac{\theta_{\text{бр}} - \hat{\theta}}{\hat{\theta} \sqrt{\frac{2}{T_{\epsilon} \hat{\Omega}_{\epsilon}}}} \right), \text{ если } Z_{\epsilon} / T_{\epsilon} < \theta_{\text{пр}},$$

задана норма на абсолютный (суммарный) показатель (3.3)

$$\hat{\alpha} = 1 - F_0 \left(\frac{Z_{\epsilon} - \theta_{\epsilon}^*}{Z_{\epsilon} \sqrt{\frac{2}{T_{\epsilon} \hat{\Omega}_{\epsilon}}}} \right), \text{ если } Z_{\epsilon} > \theta_{\epsilon}^*,$$

$$\hat{\beta} = 1 - F_0 \left(\frac{\theta_{\epsilon}^* - Z_{\epsilon}}{Z_{\epsilon} \sqrt{\frac{2}{T_{\epsilon} \hat{\Omega}_{\epsilon}}}} \right), \text{ если } Z_{\epsilon} \leq \theta_{\epsilon}^*.$$

задана норма на абсолютный (суммарный) показатель, браковочный и приемочный уровни

$$\hat{\alpha} = 1 - F_0 \left(\frac{Z_{\epsilon} - \theta_{\epsilon}^{\text{бр}}}{Z_{\epsilon} \sqrt{\frac{2}{T_{\epsilon} \hat{\Omega}_{\epsilon}}}} \right), \text{ если } Z_{\epsilon} > \theta_{\epsilon}^{\text{бр}},$$

$$\hat{\beta} = 1 - F_0 \left(\frac{\theta_{\epsilon}^{\text{бр}} - Z_{\epsilon}}{Z_{\epsilon} \sqrt{\frac{2}{T_{\epsilon} \hat{\Omega}_{\epsilon}}}} \right), \text{ если } Z_{\epsilon} < \theta_{\epsilon}^{\text{бр}}.$$

Малое значение наблюдаемого риска заказчика $\hat{\beta} \leq 0,1$ свидетельствует о том, что в следующем году вероятность получения дополнительной прибыли заказчиком за счет того, что реализованные значения нормируемых показателей надежности окажутся лучше норм, достаточно высока ($1 - \hat{\beta} \geq 0,9$). На получение части этой прибыли может рассчитывать и поставщик. Эксплуатант при планировании работы такого ЛА на следующий год может ориентироваться на показатели надежности, достигнутые в этом году.

Малое значение наблюдаемого риска поставщика ($\hat{\alpha} \leq 0,1$) свидетельствует о том, что в следующем году вероятность возникновения у заказчика убытков за счет того, что реализованные значения нормируемых показателей надежности окажутся хуже норм, достаточно велика ($1 - \hat{\alpha} \geq 0,9$). Поставщик должен быть готов возместить эти убытки заказчику, а также обязан провести расследование причин неудовлетворительных результатов эксплуатации данного ЛА. Эксплуатант для планирования работ такого ЛА на следующий год может ориентироваться на показатели, достигнутые им в этом году.

Блок-схема алгоритма контроля надежности по результатам эксплуатации приведена на рис. 3.4.

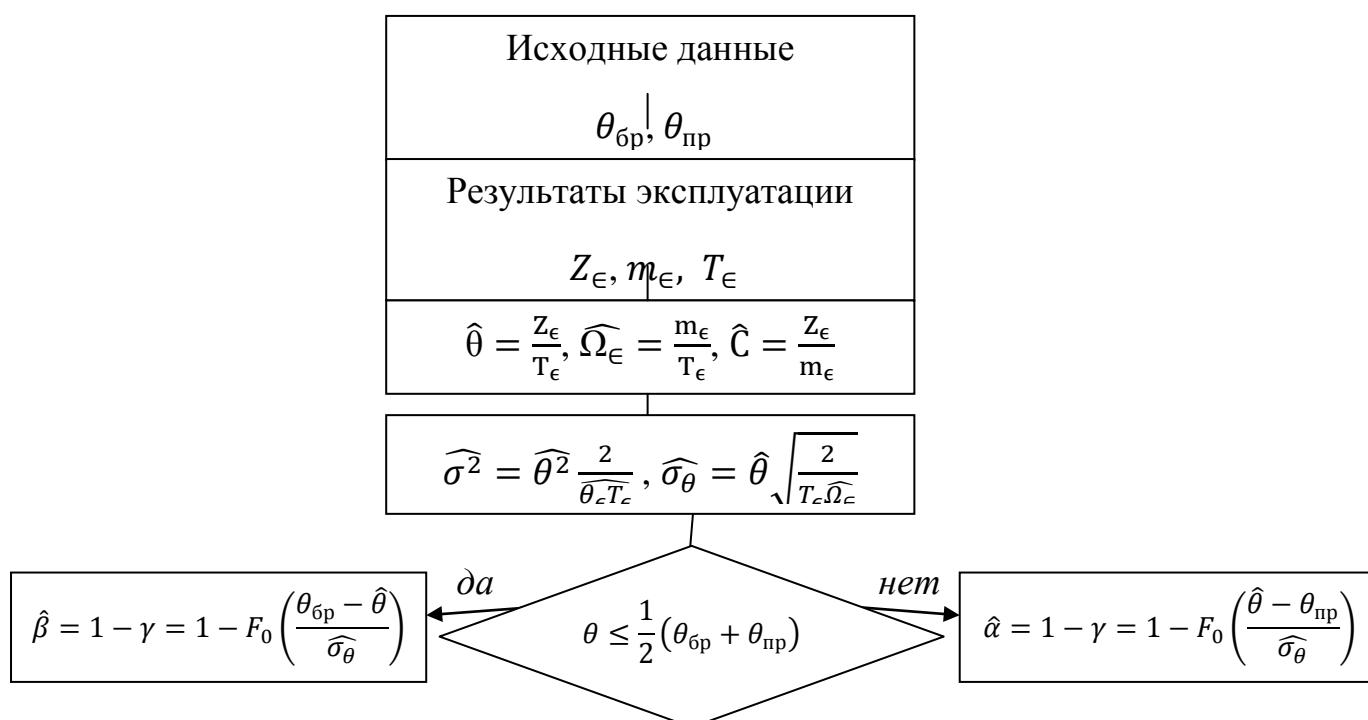


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритма контроля норм надежности по результатам эксплуатации

Определение величины абсолютного (суммарного) нормируемого показателя надежности Z_k по результатам эксплуатации может осуществляться на основе фактических данных, регистрируемых при отказах, или на основе нормативов на временные и материальные затраты, технологии проведения необходимых работ при возникновении отказа.

В тех случаях, когда величины, используемые при определении нормируемых показателей надежности, не зависят или слабо зависят от деятельности эксплуатанта, целесообразно определять оценку нормируемых показателей, используя фактические данные. К таким нормируемым показателям относятся:

В тех случаях, когда величины, используемые при определении нормируемых

показателей надежности, не зависят или слабо зависят от деятельности эксплуатанта, целесообразно определять оценку нормируемых показателей, используя фактические данные. К таким нормируемым показателям относятся:

- расход авиатоплива при прерванных полетах и неплановых работах по восстановлению исправности ЛА после отказов и повреждений;
- затраты, связанные с задержкой рейсов и прерванными полетами;
- затраты на запасные части и материалы, использованные на восстановление исправности ЛА после отказов или повреждений.

В тех случаях, когда величины, используемые для определения нормируемых показателей надежности, зависят от деятельности эксплуатанта, необходимо использовать различные нормативы для определения этих показателей. Такой подход исключает ухудшение оценки показателей по результатам эксплуатации из-за неудовлетворительной работы эксплуатанта.

К таким нормируемым показателям относятся:

трудоемкость работ, связанных с восстановлением исправности ЛА после отказов или повреждений;

суммарное время задержек рейсов и время восстановления исправности после отказов или повреждений ЛА, отстраненного от рейса, с момента запланированного вылета.

3.3. Оперативная оценка надежности серийных партий изделий

Задача оперативной оценки надежности серийных партий изделий может быть сформулирована следующим образом. Пусть новые (ремонтные) изделия выпускаются заводом-изготовителем (ремонтным заводом) серийными партиями. Под серийной партией изделий будем понимать группу изделий в количестве $N_{п}$ штук, выпускаемых заводом за определенный календарный интервал времени $\tau_{ВП} = 1, 3, 6, 12$ мес.) По мере изготовления изделия отгружаются на склады потребителей, где каждое i -е изделие хранится случайное время T_{xi} до момента установки на объект, на котором они эксплуатируются с разной интенсивностью наработки в единицу календарного времени. Эксплуатация изделия продолжается в течение случайного интервала календарного времени $\tau_{эi}$ до случайной наработки $t_{эi}$ (замены вследствие отказа или профилактической замены).

Пусть известны число изделий в j -й партии $N_{пj}$, даты начала и окончания периода изготовления этой партии $\Theta_{нип}$ и $\Theta_{оип}$, число изделий этой партии $n_{0j}(\Theta_r)$ ожидавших до момента календарного времени Θ_r , наработка $T_{оij}$ каждого отказавшего i -го изделия j -й партии, число изделий этой партии $m_{пj}(\Theta_r)$, снятых вследствие профилактической замены к моменту Θ_r и наработка $T_{пк}$; каждого k -го профилактически замененного изделия.

Требуется определить показатели надежности j -й партии в любой произвольный момент времени, достаточно удаленный от периода ее изготовления.

Достаточным удалением будем считать интервал времени, за который часть изделий партии успеет получить максимально возможную наработку. В случае, когда Θ_r взят в конце периода эксплуатации всей партии изделий, задача решается известными методами, применяемыми при классическом эксперименте, базирующемся на постоянном исходном числе наблюдаемых изделий. Однако такой момент наступает обычно через несколько лет после выпуска партии и поэтому результаты такого расчета обесцениваются. В остальных случаях в момент оценки Θ_r , когда часть изделий заменена, а остальные продолжают эксплуатироваться либо хранятся на складе, возникает задача оценки надежности переменного парка серийных изделий, т.е. число изделий $N_{\tau_{zi}}(t_i)$ имеющих в момент календарного времени наработку $t \geq t_i$.

Наиболее простыми показателями надежности является средняя наработка до отказа $T_{ср0}$ и средняя наработка до замены $T_{ср3}$. Однако в общем случае определение этих показателей на ранней стадии эксплуатации оказывается невозможным. В связи с этим возникает необходимость в применении других показателей надежности, таких как вероятность безотказной работы $P(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$ вероятность замены $P_3(t)$, интенсивность замен $M_3(t)$ и гамма-процентный ресурс. Эти показатели могут быть заданы дискретно в функции от наработки или номеров проверок с фиксированной периодичностью.

Формулы для определения показателей надежности переменного парка серийных изделий имеют вид:

$$\lambda(\Delta t_i) = \frac{n_{\tau_r}(\Delta t_i)}{(N_{\tau_r}(\Delta t_i) - \sum_{j=1}^{i-1} n_{\tau_r}(\Delta t_j)) \Delta t_i},$$

$$P(t_i) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^i n_{\tau_r}(\Delta t_j)}{N_{\tau_r}(t_i)},$$

$$\mu(\Delta t_i) = \frac{m_{\tau_r}(\Delta t_i) + n_{\tau_r}(\Delta t_i)}{(N_{\tau_r}(t_i) - \sum_{j=1}^{i-1} n_{\tau_r}(\Delta t_j) - \sum_{j=1}^{i-1} m_{\tau_r}(\Delta t_j)) \Delta t_i},$$

$$P_3(t_i) = \frac{\sum_{j=1}^i m_{\tau_r}(\Delta t_j) + \sum_{j=1}^i n_{\tau_r}(\Delta t_j)}{N_{\tau_r}(t_i)},$$

$$v_i = P(t_i) \cdot 100 = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^i m_{\tau_r}(\Delta t_j) + \sum_{j=1}^i n_{\tau_r}(\Delta t_j)}{N_{\tau_r}(\Delta t_i)} \right) \cdot 100,$$

где $m_{\tau_r}(\Delta t_j)$ - число изделий, профилактическая замена которых произведена в интервале наработки Δt_j ; $n_{\tau_r}(\Delta t_j)$ - число изделий, отказавших в интервале наработки Δt_j к моменту календарного времени τ_r .

Обозначим через $P_{\tau_r}(T \geq t_i)$ вероятность того, что к моменту τ_r изделие, принадлежащее партии N_{ni} , будет иметь наработку $T > t_i$; тогда $N_{\tau_r}(t_i) = N_n P_{\tau_r}(T \geq t_i)$ так как все остальные величины, необходимые для оценки показателей надежности партии серийных изделий, известны.

Для определения вероятности $P_{\tau_r}(T \geq t_i)$ необходимо описать случайный

процесс изменения наработки изделий t при изменении календарного времени τ .

Исходными статистическими данными служат: дата выпуска θ_{bi} , дата установки изделия на объект θ_{yi} , дата снятия изделия с объекта вследствие отказа $\theta_{ci} - \theta_{oi}$, при профилактической замене $\theta_{ri} = \theta_{pi}$ и наработка изделия T с момента установки до момента снятия. Случайная функция $t(\tau)$ является результатом сложения трех независимых случайных величин $\theta_n, \tau_x (\tau_x = \theta_{yi} - \theta_{Bi})$ и $W (W_i = T / (\theta_{ci} - \theta_{yi}))$.

Для упрощения рассмотрим вместо случайных величин случайную величину $\tau_{Hx} (\tau_x = \theta_{yi} - \theta_{нип})$. Тогда плотность распределения $f(\tau_{Hx})$ будет определять начальные условия случайного процесса $t(\tau)$.

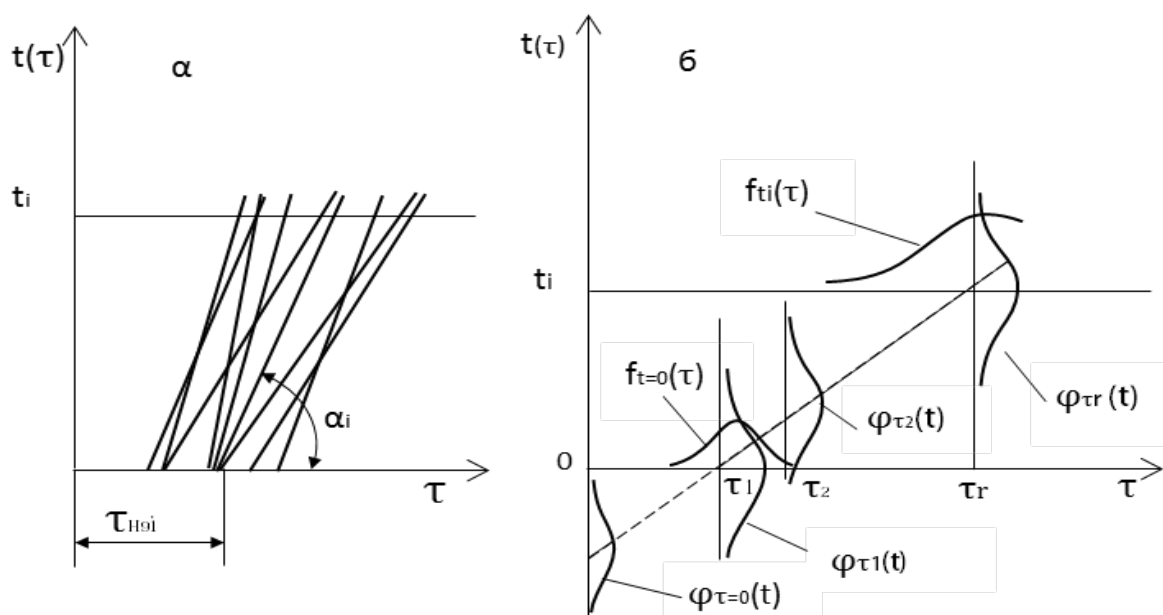


Рис. 3.5. Схема модели оценки надежности серийных изделий в эксплуатации:
 а - реализации процесса эксплуатации изделий;
 б - двумерный случайный процесс наработки изделий в эксплуатации $t(\tau)$.

Если отдельные реализации процесса наработки $t(\tau)$ можно аппроксимировать линейными зависимостями (рис. 3.5, а), то вторая случайная величина $W_i = tg\alpha_i$. Таким образом, две случайные величины $T_{ни}$ и W полностью определяют случайный процесс $t(\tau)$ (рис. 3.5, б).

Наиболее простой характеристикой случайной функции $t(\tau)$ является одномерная плотность распределения $\varphi_{\tau_j}(t)$ которая характеризует распределение случайной функции $t(\tau)$ в любой момент календарного времени. Распределение времени τ до первого пересечения уровня t_i будет задано плотностью $f_{t_i}(\tau)$.

Если θ - случайный момент календарного времени пересечения процессом уровня t_i , то при $\tau_k > \tau_{Hэ}$

$$P\{\theta > \tau_r\} = P\{W(\tau_k - \tau_{Hэ}) \leq t_i\}.$$

Тогда вероятность

$$P_{\tau_r}\{T > t_i\} = 1 - P\{W(\tau_k - \tau_{HЭ}) \leq t_i\}.$$

Справедливо и обратное, что

$$P\{\theta < \tau_r\} = P\{W(\tau_k - \tau_{HЭ}) > t_i\}.$$

Вместе с тем

$$P\{\theta < \tau_r\} = \int_0^{\tau_r} f_{t_i}(\tau) d\tau, \\ P\{W(\tau_k - \tau_{HЭ}) \geq t_i\} = \int_{t_i}^{\infty} \varphi_{\tau_Y}(t) dt.$$

Поэтому

$$P_{\tau_r}\{T \geq t_i\} = \int_0^{\tau_r} f_{t_i}(\tau) d\tau = \int_{t_i}^{\infty} \varphi_{\tau_Y}(t) dt.$$

Для того, чтобы реализовать полученное решение при изменении τ во всем диапазоне $\tau > \tau_{HЭ}$ и $t_i > 0$ не прибегая при этом к усеченным распределениям, может быть применен следующий формальный прием. Он заключается в сведении задачи к известным задачам по описанию линейного износа. Для этого условно считаем, что процесс начинается не при $t = 0$ и $\tau = \tau_{HЭ}$, а при $\tau = 0$ и $t = -\beta$.

При этом точки $\tau_{HЭ}$ как бы являются результатом пересечения процессом уровня $\tau = 0$, а на отрицательной полуоси t можно построить фиктивное распределение с плотностью $\varphi_{\tau=0}(t)$. Тогда начальные условия будут задавать фиктивное распределение с плотностью $\varphi_{\tau=0}(t)$, а случайный линейный процесс $t(\tau)$ будет задаваться уравнением

$$t(\tau) = W\tau - \beta.$$

Рассмотрим пример решения задачи для случая, когда β и W распределены по нормальному закону.

При этом $t(\tau)$ также будет иметь нормальное распределение с параметрами

$$M\{t(\tau)\} = M\{W\}\tau - M\{\beta\}, \\ D\{t(\tau)\} = \tau^2 D\{W\} + D\{\beta\}.$$

Тогда

$$P\{T \geq t_i\} = \Phi \left[\frac{\tau_r - t_i + M\{\beta\}}{\sqrt{D\{W\}\tau_r^2 + D\{\beta\}/M^2\{W\}}} \right].$$

Полученное распределение носит название дисперсионного. От нормального распределения оно отличается тем, что $D\{\beta\}$ зависит от τ_r .

Распределение содержит три параметра

$$a = \frac{D\{W\}}{M^2\{W\}}, \quad b = \frac{D\{\beta\}}{M^2\{W\}} \quad \text{и} \quad C = \frac{t_i - M\{\beta\}}{M\{W\}}.$$

При этом оно принимает вид

$$P_{\tau_r}\{T_i \geq t_i\} = \Phi \left[\frac{\tau_r - C}{\sqrt{aT^2 + b}} \right].$$

Применение изложенного методического подхода и проведение разработанных организационно-технических мероприятий образует обратную связь по управлению надежностью и качеством серийных изделий.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Классификация резервирования объектов.
2. Оценка показателей надёжности при разных видах структурного резервирования. Виды резервирования объектов.
3. Виды структурного резервирования объектов.
4. Характеристика общего резервирования объектов.
5. Характеристика раздельного резервирования объектов.
6. Особенности скользящего резервирования и резервирования замещением.
7. Охарактеризовать модели расчета надежности сложных систем.
8. Расчет надежности системы при последовательном соединении элементов.
9. Оценка показателей надёжности при разных видах структурного резервирования.
10. Расчет надежности системы при параллельном соединении элементов.
11. Анализ надёжности функциональных систем методом структурных схем и условия его применения.
12. Анализ надёжности функциональных систем методом логических схем и условия его применения.
13. Анализ надёжности функциональных систем табличным методом и условия его применения.
14. Пути повышения надёжности функциональных систем ЛА.
15. Воздействие на надёжность объектов внешних и внутренних факторов.
16. Требования к надёжности по обеспечению безопасности полётов.
17. Задание и распределение требований к надёжности. Выбор проектных решений с учётом надёжности.
18. Пути повышения надёжности АТ при проектировании
19. Роль человеческого фактора в обеспечении надежности АТ при эксплуатации.
20. Требования ИКАО к надежности сложных систем авиационной техники.
21. Охарактеризовать методы нормирования показателей надежности на этапе проектирования.
22. Принципы ускоренных испытаний объектов на надёжность.

23. Принципы форсированных испытаний.
24. Коэффициент ускорения испытаний.
25. Принцип экстраполяции по времени (наработке).
26. Проектирование элементов конструкции объектов на заданную надежность.
27. Конструктивные методы обеспечения надежности объектов.
28. Резервирование – как способ повышения надежности объектов при проектировании.
29. Технологические способы обеспечения надежности объектов.
30. Влияние технологических процессов изготовления объектов на надежность.
31. Влияние упрочняющих технологических процессов на надежность объектов.
32. Технологические причины отказов.
33. Охарактеризовать дефекты материалов.
34. Охарактеризовать дефекты технологических процессов формообразования деталей.
35. Охарактеризовать дефекты термообработки деталей.
36. Охарактеризовать дефекты сборки и испытаний систем и изделий.
37. Методы статистического контроля качества объектов.
38. Роль и место статистических методов управления качеством продукции в обеспечении надежности объектов.
39. Показать сущность методов статистического контроля надежности по альтернативному признаку.
40. Характеристика одноступенчатого и последовательного контроля надежности по альтернативному признаку.
41. Индивидуальный контроль надежности авиационной техники при эксплуатации.
42. Характеристика информационного обеспечения анализа авиационной техники.
43. Инженерный анализ отказов и повреждений авиационной техники.
44. Оценка эффективности мероприятий по повышению надежности объектов.
45. Статистическое регулирование безотказности объектов в эксплуатации.
46. Определение количества запасных частей по статистическим данным о надежности объектов.
47. Прогнозирование надежности объектов.
48. Характеристика эксплуатационных методов обеспечения надежности объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Основы теории надежности. Часть I: учебное пособие, - М.; МГТУ ГА, 2013. 88 с.
2. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и авиадвигателей. Часть 2: учебное пособие. - М.: МГТУГА, 1995.
3. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники. Пособие по выполнению лабораторных работ «Анализ физической сущности типовых отказов и повреждений авиационной техники». – М.: МГТУ ГА, 2011.
4. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники. Пособие по выполнению практических занятий «Оценка показателей надежности авиационной техники» –М.: МГТУ ГА, 2012.
5. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Пособие по изучению дисциплины и выполнению курсовой работы “Оценка показателей надежности авиационной техники”. - М.: МГТУ ГА, 2015.
6. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники: Пособие по выполнению контрольной работы. – М.: МГТУ ГА, 2006.
7. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Эффективность процессов эксплуатации летательных аппаратов. Пособие по выполнению курсового проекта «Анализ эффективности процессов эксплуатации изделий летательных аппаратов». - М.: МГТУ ГА, 2005.
8. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. С-Пб.: БХВ-Петербург. 2006.
9. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
10. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем. Учебное пособие. — М.: Дрофа, 2008.

ISBN 978-5-86311-995-3



9 785863 119953