

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
И РЕМОНТ АВИАЦИОННЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
И ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫХ  
КОМПЛЕКСОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний к курсовой работе*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2010

УДК СГАУ/656(075)  
ББК 39.5

Составитель ***В.Н. Писаренко***

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Л. М. Л о г в и н о в,  
директор Приволжского филиала института  
аэронавигации Н. П. С е л и в е р с т о в

**Техническая эксплуатация и ремонт авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов:** метод. указания к курсовой работе / сост. *В.Н. Писаренко*. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. –40 с.

Представлены сведения, необходимые для выполнения курсовой работы по дисциплине «Техническая эксплуатация и ремонт авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов». Приведены рекомендации по выполнению разделов курсовой работы, оформлению расчетно-пояснительной записки.

Методические указания предназначены для студентов авиационных факультетов, обучающихся по специальности 160903 «Техническая эксплуатация авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов».

УДК СГАУ/656(075)  
ББК 39.5

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	4
1.1. Цели и задачи курсовой работы .....	4
1.2. Содержание курсовой работы .....	4
1.3. Исходные данные .....	5
1.4. Оформление курсовой работы .....	5
1.5. Оценка курсовой работы .....	5
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ОСНОВНЫХ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	6
2.1. Выбор типа КИ системы АЭС и ПНК .....	6
2.2. Анализ особенностей конструкции КИ системы АЭС и ПНК .....	6
2.3. Определение параметров надежности КИ системы АЭС и ПНК .....	7
2.4. Количественные показатели надежности.....	8
2.5. Вероятность безотказной работы.....	9
2.6. Надежность АЭС и ПНК и их влияние на надежность авиационной техники.....	17
2.7. Основные направления совершенствования АЭС и ПНК и повышения уровня их надежности.....	18
2.8. Реализованные уровни надежности АЭС и ПНК.....	20
2.9. Тенденции развития работ в области надежности АЭС и ПНК.....	21
2.10. Законы распределения случайных величин.....	23
<i>Биномиальное распределение.....</i>	23
<i>Распределение Пуассона.....</i>	24
<i>Экспоненциальное распределение.....</i>	24
<i>Распределение Вейбулла.....</i>	26
<i>Нормальное (гауссово) распределение.....</i>	27
<i>Распределение <math>\chi</math>-квадрат.....</i>	30
3. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ КИ (на примере МГВ-1СК АБСУ-154-2).....	31
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	38

# **1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

## **1.1. Цели и задачи курсовой работы**

Основными целями и задачами выполняемой курсовой работы являются:

- систематизация, закрепление и расширение теоретических знаний по технической эксплуатации и ремонту авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов (АЭС и ПНК), полученных при изучении предшествующих специальных дисциплин;
- углубленное изучение конкретной авиационной техники с целью последующего технически грамотного решения практических задач по освоению типового технологического процесса технической эксплуатации и ремонту авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов.

## **1.2. Содержание курсовой работы**

Курсовая работа имеет типовую структуру, все отклонения от которой должны быть согласованы с руководителем до начала выполнения работы, и состоит из следующих разделов:

Введение (формулируются цели курсовой работы и обосновывается актуальность решаемых в курсовой работе задач).

1. Анализ особенностей конструкции конкретной системы или комплектующего изделия авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов – приводятся технические характеристики и техническое описание особенностей конструкции системы или комплектующего изделия.

2. Проектирование системы контроля заданного комплектующего изделия (КИ) или системы АЭС и ПНК – выбираются системы двух различных типов и определяются их основные проектные параметры: необходимая мощность агрегата или привода, мощность и тип источника энергии для питания агрегата или КИ, суммарная масса систем контроля для заданного КИ.

3. Оценка эффективности спроектированных систем контроля (с использованием оценочных критериев) – дается заключение о эффективности и целесообразности применения для заданного КИ системы контроля того или иного типа.

Заключение (приводятся краткие выводы и основные результаты выполненной курсовой работы).

### **1.3. Исходные данные**

Исходными данными для выполнения курсовой работы являются: тип, количество, технические характеристики установленного на ВС заданного КИ АЭС и ПНК, продолжительность процесса работы, потребляемая мощность. Исходные данные выбираются в соответствии с полученным у преподавателя заданием.

### **1.4. Оформление курсовой работы**

Курсовая работа состоит из пояснительной записки и расчетов.

Пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями стандарта института [1] и ЕСКД и должна содержать: титульный лист (указывается название курсовой работы, приводятся сведения об авторе, годе и месте написания работы); реферат; исходные данные, содержание, перечень сокращений, введение, основную текстовую часть по разделам; заключение; список использованной литературы (в порядке упоминания). Текст пояснительной записки набирается на компьютере (шрифт Times New Roman, размер шрифта 14). Поля страницы (верхнее 20мм, нижнее 20мм, левое 30мм, правое 20мм), межстрочный интервал 1,5, шрифт черного цвета, полужирный, на одной стороне белого листа бумаги формата А4, после переплетения помещается в обложку. Не рекомендуется изложение текста от первого лица единственного числа. Поля страницы рамкой не выделяются и текстом не занимаются. Страницы пояснительной записки нумеруются, начиная с титульного листа (номер страницы на титульном листе не пишется), каждый раздел должен начинаться с новой страницы. В текст пояснительной записки могут быть введены таблицы и иллюстрации, помещаемые по ходу изложения материала. Все расчетные формулы должны быть вначале написаны как вставка /объект в символьном виде с пояснением обозначения каждого символа, а затем в формулу подставляются числа и приводится результат с указанием его размерности. Ссылки на использованные литературные источники обязательны.

### **1.5. Оценка курсовой работы**

Руководителю для оценки представляется законченная курсовая работа. При постановке оценки учитывается степень компетентности студента в решаемых задачах курсовой работы, качество ее выполнения и оформления, планомерность работы, а также представление законченной курсовой работы в установленный срок.

## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ОСНОВНЫХ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

### **2.1. Выбор типа КИ системы АЭС и ПНК**

В данном разделе приводится техническое описание системы или КИ, заданных в задании:

- назначение системы или КИ;
- технические характеристики системы или КИ;
- техническое описание конструкции системы или КИ (циклограмма работы);
- принцип их работы.

### **2.2. Анализ особенностей конструкции КИ системы АЭС и ПНК**

Работа КИ системы АЭС и ПНК является важным эксплуатационным режимом, значительно влияющим на безопасность и регулярность полетов. Важнейшим показателем работы КИ и системы, обеспечивающих безотказную работу, является их надежность. Опыт проектирования и эксплуатации авиационных АЭС и ПНК показывает, что рациональный выбор типа и параметров КИ и системы АЭС и ПНК является достаточно сложной задачей. С одной стороны, КИ и система АЭС и ПНК должны обеспечивать выполнение основного и обязательного требования – надежной работы во всем заданном диапазоне условий эксплуатации летательного аппарата. С другой стороны, масса, габариты и потребляемая электроэнергия КИ и системы должны быть минимальными. Кроме этих факторов при выборе типа КИ системы необходимо учитывать целый ряд специальных требований, предъявляемых к системам АЭС и ПНК [2, 6].

Основные факторы, влияющие на выбор типа и параметров проектируемых КИ системы, представлены на рис. 1.

В первую очередь выбор типа и параметров КИ системы зависит от величины и требуемого характера реализуемых параметров, в том числе изменения потребляемой мощности от системы электроснабжения при работе КИ и системы.

Выбранные альтернативные КИ системы для заданного в номере варианта задания перед проведением поверочных расчетов согласуются с руководителем курсовой работой.



Рис. 1. Основные факторы, определяющие выбор параметров комплектующих изделий системы АЭС и ПНК

### 2.3. Определение параметров надежности КИ системы АЭС и ПНК

Сущность решения проблемы обеспечения надежности комплектующих изделий заключается в изучении физических причин появления и закономерностей развития отказов, рассматриваемых в качестве случайных событий, возникающих и изменяющихся во времени, и разработка на этой основе научных и инженерных методов создания комплектующих изделий с заданным в соответствии с требованиями уровнем надежности. Поскольку отказы как случайные события имеют вероятностный характер зависимости от времени, то для изучения их закономерностей применимы теория вероятностей и теория математической статистики.

Конкретный вид этих закономерностей для отдельных комплектующих изделий определяется характером влияния различных физических факторов на природу возникновения и развития отказов. В числе таких факторов могут быть износ и старение материалов элементов изделия, накопление усталостных повреждений, наличие производственно-технологических дефектов (прижоги и перегревы), неоднородность материалов, наличие местных концентраторов напряжений, трещины, волосовины, а также несоответствие фактических условий и нагружений расчетно-допустимым, превышение предельно допустимых параметров (напряжения, частоты, температуры, вибраций и др.) при эксплуатации комплектующих изделий.

Отказы комплектующих изделий имеют разнообразные формы проявления. К числу наиболее характерных проявлений отказов можно отнести отклонения выходных параметров функциональных систем или их КИ от нормативных значений (например по мощности, чувствительности) или выход параметров за установленные ограничения (например, по напряжению или частоте); проявление отказов может быть также в виде механических повреждений, приводящих к появлению трещин, поломок или деформаций, а также в виде рассогласования взаимодействия регулирующих и управляющих систем, снижения точностных характеристик, что, в конечном счете, приводит к ухудшению или резкому изменению безотказности и долговечности комплектующего изделия.

## **2.4. Количественные показатели надежности**

В соответствии с ГОСТ 27.002—86 для количественной оценки надежности применяют количественные показатели отдельных свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также комплексные показатели, характеризующие готовность и эффективность использования изделий. Эти показатели позволяют проводить сравнительную расчетно-аналитическую оценку количественных характеристик отдельных свойств изделий при выборе различных схемных и конструктивных вариантов изделий при их разработке и испытаниях.

Комплексные показатели надежности используются главным образом на этапах испытаний и эксплуатации при оценке и анализе соответствия эксплуатационно-технических характеристик изделий заданным требованиям. Выбор конкретной номенклатуры количественных показателей надежности изделий обусловлен решением следующих задач:

- выполнение расчетов и сравнительный анализ надежности возможных различных вариантов схем АЭС и ПНК и его КИ, а также оценка результатов моделирования и лабораторно-стендовых испытаний. В этом случае наиболее часто используют такие показатели, как интенсивность отказов, наработку на отказ и вероятность безотказной работы, т.е. характеристики безотказности;
- общая оценка уровня надежности изделий, динамики его изменения в процессе серийного производства и эксплуатации, а также сравнение уровня надежности данного изделия с другими аналогичными изделиями. В этом случае наибольшее применение находят показатели безотказности и долговечности, наработка на отказ, ресурс. При этом особое внимание уделяется анализу их улучшения при введении новых конструктивных и производственных мероприятий;
- оценка уровня эксплуатационно-технических характеристик КИ АЭС и ПНК и, особенно, оценка эффективности их применения и эксплуатационных



затрат. Для этого в основном используются комплексные показатели надежности: коэффициенты готовности, технического использования и сохранения эффективности.

Оценка показателей на более высоком уровне невозможна без предварительной оценки соответствующих показателей на предыдущем уровне. Поэтому на этапах проектирования и испытаний должны быть оценены расчетно-аналитическим способом такие показатели, как интенсивность отказов и наработка на отказ.

Показатель надежности может иметь размерность (например, наработка на отказ в часах) или не иметь ее (например, вероятность безотказной работы).

Для количественной оценки безотказности применяют следующие показатели:

- вероятность безотказной работы;
- среднюю наработку на отказ для восстанавливаемых и среднюю наработку до отказа – для невосстанавливаемых изделий;
- параметр потока отказов – для восстанавливаемых изделий и интенсивность отказов – для невосстанавливаемых изделий.

## 2.5. Вероятность безотказной работы

В задачах надежности время работы до отказа считается непрерывной случайной величиной. Если при  $t = t_0$  изделие начало работать, а при наработке  $t = t_{om}$  потеряло работоспособность, то наступление отказа есть событие, заключающееся в том, что  $\{t_{or} < t\}$ , т. е. в том, что случайная величина оказалась не в поле времени  $t$ . Одним из основных количественных показателей надежности является вероятность того, что время безотказной работы окажется больше заданного времени  $t$ :

$$P(t) = \text{Вер}\{t_{or} > t\}. \quad (2.1)$$

Функцию  $P(t)$  называют вероятностью безотказной работы (часто функцией надежности, иногда – просто надежностью).

Вероятностью отказа называется соответственно функция

$$Q(t) = \text{Вер}\{t_{or} \leq t\}. \quad (2.2)$$

Так как при любом значении наработки  $t$  изделие может быть только или работоспособным, или потерявшим работоспособность, то вероятность того, что оно находится в одном из двух указанных состояний, есть вероятность достоверного события и, следовательно,

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (2.3)$$

Графики изменения функций  $P(t)$  и  $Q(t)$  даны на рис. 2.

Итак, вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникнет. Этот показатель может применяться как количественный критерий надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий. Он всегда меньше единицы. Однако при его нормировании или расчете необходимо указывать время или наработку, когда значение этого показателя должно быть не ниже указанной величины. Например, в технических требованиях на самолет может быть задана вероятность безотказной работы не ниже 0,98 за один полет продолжительностью 4 часа, для невосстанавливаемого агрегата может быть задана вероятность безотказной работы не ниже 0,90 при наработке 250ч.

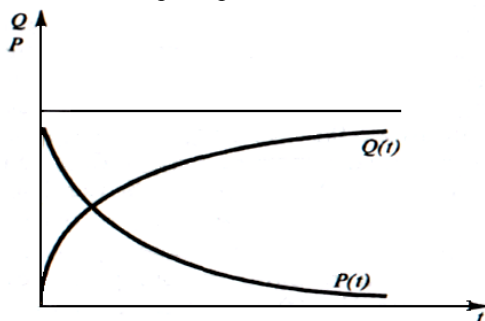


Рис. 2. График функций  $P(t)$  и  $Q(t)$

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  может быть приближенно определена из рассмотрения результатов эксплуатации или испытаний большого числа  $N$  однотипных устройств. Если в любой момент времени  $t$  функция  $N_{OT}$  определяет число отказавших устройств к этому моменту, а  $N_{И}$  — число исправных к этому же моменту времени устройств, то очевидно, что  $N_{OT}(t) + N_{И}(t) = N$ . При  $N \rightarrow \infty$  отношение  $N_{И}(t)/N \rightarrow P(t)$ .

Функция  $N_{И}(t)/N$ , вообще говоря, ступенчатая, так как  $N_{И}$  при каждом отказе уменьшается на единицу. Но при больших  $N$  будем считать, что  $N_{И}(t)/N$  сколь угодно близко приближается к непрерывной монотонно убывающей функции  $P(t)$ ? т.е.

$$N_{И}(t)/N = P(t). \quad (2.4)$$

Очевидно, что  $P(t)$  – убывающая функция времени, так как при отсутствии восстановления число исправных изделий из общего числа  $N$  с увеличением наработки уменьшается. При отсутствии наработки ( $t = 0$ ) отказов еще быть не может и  $P(t) = 1$ , а при  $t \rightarrow \infty$   $P(t) \rightarrow 0$ .

Примерный вид функций  $P(t)$  и  $Q(t) = 1 - P(t)$  показан на рис. 3.

Аналогично уравнению (2.4) имеем:

$$N_{OT}(t) / N = Q(t). \quad (2.5)$$

Если взять малый интервал  $(t, t + \Delta t)$ , то  $\Delta N_{OT}(t, t + \Delta t)$  – число отказов в этом интервале, а выражение  $\Delta N_{OT}(t, t + \Delta t) / N$  – есть опытная величина вероятности отказа за время  $\Delta t$ .

Отношение величины вероятности отказа в малом интервале  $(t, t + \Delta t)$  к продолжительности этого интервала является одной из важных характеристик надежности – плотности вероятности отказов  $f(t)$ :

$$f(t) = \frac{\Delta N_{OT}(t, t + \Delta t) / N}{\Delta t}. \quad (2.6)$$

Чем больше  $N$  и меньше  $\Delta t$ , тем точнее формула (2.6), которая в пределе при  $N \rightarrow \infty$  и  $\Delta t \rightarrow 0$  имеет вид

$$f(t) = dQ(t)/dt. \quad (2.7)$$

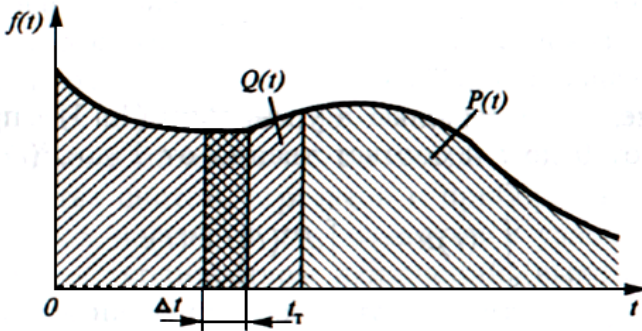


Рис. 3. График плотности вероятности отказов  $f(t)$

Если изобразить кривую  $f(t)$  (рис. 3), то можно видеть, что площадь под кривой  $f(t)$ , ограниченная снизу отрезком  $\Delta t$  оси абсцисс, численно равна вероятности отказа в интервале  $\Delta t$ , что также следует из выражений (2.6) и (2.7). Соответственно вероятность отказа за время  $t$  есть интеграл от  $f(t)$ , взятый для интервала от 0 до  $t$ :

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (2.8)$$

Если  $t = \infty$ , то вероятность отказа равна единице. Из этого следует, что вся площадь под кривой  $f(t)$  всегда равна единице.

Но, так как  $\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$ , можно записать, что

$$P(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) означает, что вероятность безотказной работы за время  $t$  равна всей площади под кривой  $f(t)$  правее абсциссы  $t_T$  (см. рис. 3).

Так как из теории вероятностей известно, что плотность распределения есть производная функции распределения  $F(f)$ , то из сопоставления этого факта с выражениями (2.7) и (2.8) очевидно, что в задачах надежности функция распределения имеет смысл вероятности отказа, т.е.  $F(t) = Q(f)$  и  $P(t) = 1 - F(t)$ .

Если далее величину  $\Delta N_{OT}(t, t + \Delta t)$ , т.е. число отказов в малом интервале  $(t, t + \Delta t)$  разделим не на общее число  $N$  однотипных устройств, а на число  $N_H(t)$  безотказно проработавших до начала этого интервала, то получим величину  $\Delta N_{OT}(t, t + \Delta t)/N_H(t)$  – вероятность отказа в интервале  $(t, t + \Delta t)$  изделий, благополучно доработавших до начала этого интервала.

Если теперь взять отношение этой величины к продолжительности интервала  $(t, t + \Delta t)$ , то получим важнейшую и очень распространенную характеристику надежности – интенсивность отказов (для невосстанавливаемых изделий)

$$\lambda(t) = \frac{\Delta N_{OT}(t, t + \Delta t) / N_H(t)}{\Delta t}. \quad (2.10)$$

Интенсивность отказов, как и плотность вероятности отказов, характеризует вероятность отказа в интервале  $(t, t + \Delta t)$ . Но плотность вероятности отказов – это вероятность отказа любого из общего числа  $N$  рассматриваемых устройств (априорная вероятность). Интенсивность же отказов характеризует условную вероятность отказа в малом интервале времени, т.е. вероятность отказа за  $\Delta t$  только тех устройств, которые остались работоспособными к моменту наработки  $T$ .

Найдем связь между  $P(t)$ ,  $f(f)$  и  $\lambda(t)$ . Для этого воспользуемся упомянутой выше схемой эксплуатации (испытания)  $N$  устройств,  $N_H(t)$  из которых в каждый момент времени исправны, а  $N_{OT}(t)$  – отказали.

Умножим и разделим выражение (2.10) на  $N$ :

$$\lambda(t) = \frac{\Delta N_{OT}(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N_H(t)}. \quad (2.11)$$

Сравнивая выражение (2.11) с (2.4) и (2.6), получаем

$$f(f) = P(t) \cdot \lambda(t). \quad (2.12)$$

Так как

$$P(t) = 1 - Q(f), \quad dP(t)/dt = -dQ(f)/dt,$$

тогда, с учетом (2.7), получаем

$$\frac{dP(t)}{dt} = -P(t) \cdot \lambda(t). \quad (2.13)$$

Теперь, разделяя переменные в уравнении (2.13), проинтегрируем его в пределах от 0 до  $t$  и соответственно от 1 до  $P(t)$ :

$$\int_0^t \lambda(t) dt = - \int_1^{P(t)} dP(t) / P(t).$$

Так как

$$\int_1^{P(t)} dP(t) / P(t) = \ln P(t), \text{ получаем } \ln P(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt$$

$$\text{или } P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) является одним из наиболее практически важных соотношений в теории надежности. Из соотношения формул (2.13) получаем точную формулу для вычисления интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = - \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.15)$$

В том случае, когда  $\lambda(t) = \text{const}$  и известна наработка  $T_0$ , приходящаяся на один отказ, имеем:

$$P(t) = e^{-\lambda(t)} = e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (2.16)$$

Все рассмотренные выше характеристики надежности на практике определяются путем обработки статистических данных, которая достаточно трудоемка. Поэтому наряду с ними широкое использование в практике находят такие критерии надежности, как наработка на отказ восстанавливаемого и наработка до отказа невосстанавливаемого изделия. Эти показатели очень удобны для понимания уровня надежности и применяются как при расчетном анализе, так и при оценке надежности по результатам испытаний и эксплуатации изделий.

Для восстанавливаемых комплектующих изделий наработка на отказ определяется как отношение наработки изделия к математическому ожиданию его отказов в течение этой наработки.

Для невосстанавливаемых комплектующих изделий применяется показатель средней наработки до отказа, который определяется как математическое ожидание наработки изделия до первого отказа. Нарботка на отказ означает, что в течение этого времени вероятно появление одного отказа, приводящего к нарушению работоспособности изделия. Широкое распространение получили такие показатели надежности изделий, как наработка на один отказ, приводящая к выключению изделия в полете, и наработка на отказ, приводящая к необходимости досрочного съема изделия с самолета.

Для большинства систем, агрегатов и приборов наработка на отказ оценивается в часах налета, а для агрегатов и узлов с прерывистыми циклами работы – количеством включений (выключений) или циклов, приходящихся на один отказ (это агрегаты и приборы систем запуска двигателей, управление шасси, механизацией компрессора и реверса двигателей и т.п.).

Для невосстанавливаемых изделий при эксплуатации и испытаниях  $N$  экземпляров среднее время наработки до отказа  $T_{cp}$  может быть определено по формуле

$$T = \frac{t_{OT1} + t_{OT2} + \dots + t_{OTN}}{N}. \quad (2.17)$$

Чем больше  $N$ , тем точнее приближенное равенство (2.17). Точные значения величины  $T_{cp}$ , которое определяется как математическое ожидание наработки до отказа, равно в соответствии с теорией вероятности

$$T_{CP} = M[t_{OT}] = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} t dQ(t) = - \int_0^{\infty} t dP(t).$$

Интегрируя по частям, получим

$$T_{CP} = -tP(t)|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.18)$$

При конечных значениях  $\lambda(t)$  функция  $e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$  при  $t \rightarrow \infty$  стремится к нулю быстрее, чем  $t \rightarrow \infty$ . Поэтому первый член в формуле (2.18) равен 0 и ее можно переписать следующим образом:

$$T_{CP} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.19)$$

Поскольку при  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$  и  $P(t) = e^{-\lambda t}$  [см. формулу (2.16)], в соответствии с (2.19) получаем

$$T_{CP} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.20)$$

Определим теперь среднюю наработку на отказ для восстанавливаемых комплектующих изделий. Восстанавливаемое изделие может за время эксплуатации иметь не один, а много отказов, причем в случае отказа происходит восстановление работоспособности комплектующего изделия тем или иным способом. В частности, могут заменяться новыми отказавшие детали и агрегаты, если, конечно, их замена возможна в условиях эксплуатации. Во всех слу-

чаях существенно лишь то, что последствия отказа ликвидируются и изделие продолжает работать, сохраняя те же свойства, что и до отказа.

Для изделий, работающих в интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$ , средняя наработка на один отказ  $T_{CP}$  может быть вычислена по следующей формуле:

$$T_{CP} = \frac{t_2 - t_1}{m_{CP}(t_2) - m_{CP}(t_1)}, \quad (2.21)$$

где  $m_{CP}(t)$  – среднее число отказов за время  $t$ .

При определении количественных показателей безотказности необходимо правильно классифицировать отказы и различать классификацию математическую (вероятностную) и инженерную (физическую). Это позволяет исключить возможные ошибки в применении формул теории вероятностей при расчетном определении уровня надежности и оценке количественных характеристик по результатам исследования и эксплуатации. Такая классификация позволяет правильно применять математические и инженерные методы анализа отказов двигателей и их агрегатов. Отказы как случайные события с позиций применения законов теории вероятностей по характеру проявления делятся на постепенные и внезапные, совместные и несовместные, зависимые и независимые.

К постепенным отказам относятся такие, которые развиваются во времени и связаны со старением, износом, усталостными повреждениями и другими факторами изменения свойств материала, а к внезапным относятся отказы, вероятность появления которых трудно увязать со временем предыдущей работы изделия; проявляются внезапные отказы без заметных внешних предупредительных признаков. Чаще всего внезапные отказы связаны с воздействием на элементы больших нерасчетных разовых или длительных нагрузок, которые могут и должны прогнозироваться на основании изучения условий эксплуатации.

Местными называются отказы (не менее двух) отдельных элементов или узлов изделия, которые могут одновременно появиться в процессе работы изделия.

Зависимыми называются отказы, вероятности, появления которых зависят друг от друга.

Если же вероятность появления одного отказа не связана с вероятностью появления другого, то такие отказы называются независимыми.

Отказы с позиций инженерного анализа причин их появления и разработки методов и средств по предупреждению различаются следующим образом:

- по месту появления – на земле, в полете;
- по последствиям – без последствий, приводят к невыполнению полетного задания, приводят к летному происшествию;

- по причинам возникновения – конструктивно-производственные ошибки, ошибки наземного технического состава, ошибки летного состава, внешние или случайные причины;

- по способу устранения – восстановление работоспособности непосредственно на месте эксплуатации, частичный ремонт на ремонтных участках, капитальный ремонт изделия на ремонтном заводе, изделие списывается.

Кроме рассмотренных выше показателей безотказности при обработке и анализе статистических данных по отказам КИ, выявляемых в эксплуатации, находят применение следующие частные критерии, характеризующие количество отказов, приходящихся на 1000 ч наработки КИ в полете:

- коэффициент  $K_{1000\text{ ОП}}$  – характеризует общее количество отказов в полете, вызвавших нарушение работоспособности КИ. Разновидностью этого коэффициента является коэффициент  $K_{1000\text{ ВП}}$ , характеризующий количество отказов, проявившихся в полете и повлекших за собой вынужденную посадку самолета;

- коэффициент  $K_{1000\text{ ДС}}$  – характеризует количество отказов, приведших к досрочному съему изделия с самолета.

Коэффициенты  $K_{1000\text{ ОП}}$  и  $K_{1000\text{ ВП}}$  имеют большое значение для анализа безопасности полета, так как отказы могут привести к таким серьезным последствиям, как вынужденная посадка, невыполнение полетного задания или летное происшествие.

Коэффициенты  $K_{1000\text{ ДС}}$  позволяет оценивать трудозатраты и экономичность эксплуатации изделий.

Количественное определение указанных выше коэффициентов производится по формулам:

$$K_{1000\text{ ОП}} = \frac{1000}{T_{\text{ОП}}}; \quad K_{1000\text{ ВП}} = \frac{1000}{T_{\text{ВП}}}; \quad K_{1000\text{ ДС}} = \frac{1000}{T_{\text{ДС}}}; \quad (2.22)$$

где  $T_{\text{ОП}}$ ,  $T_{\text{ВП}}$  и  $T_{\text{ДС}}$  – наработка на один отказ, определяемая соответственно по формулам:

$$T_{\text{ОП}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\Sigma i}}{n_{\text{ОП}\Sigma}}; \quad T_{\text{ВП}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\Sigma i}}{n_{\text{ВП}\Sigma}}; \quad T_{\text{ДС}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\Sigma i}}{n_{\text{ДС}\Sigma}}, \quad (2.23)$$

где  $t_{\Sigma i}$  – суммарная наработка  $i$ -го КИ за рассматриваемый период эксплуатации или испытаний;  $N$  – общее количество рассматриваемых однотипных КИ (или КИ одной модификации);  $n_{\text{ДС}\Sigma}$  – число досрочно снятых КИ;  $n_{\text{ВП}\Sigma}$  – число отказов КИ в полете;  $n_{\text{ОП}\Sigma}$  – общее количество отказов в полете всех КИ данного типа за рассматриваемый период эксплуатации.



## **2.6. Надежность АЭС и ПНК и их влияние на надежность авиационной техники**

АЭС и ПНК называется совокупность конструкций - объединенная совокупность авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов со всеми агрегатами и системами авиационной техники, необходимыми для эксплуатации авиационной техники. Основная функция АЭС самолета заключается в выработке электрической энергии, необходимой для обеспечения работы систем авиационной техники. Важнейшим требованием, предъявляемым к ПНК АТ, является обеспечение высокого уровня безопасности полетов, включая выполнение требований по управлению самолетом, обеспечению устойчивости и управляемости на различных режимах полета. АЭС современной авиационной техники представляют собой сложнейшие энергетические установки, параметры которых по мощности и нагрузкам соизмеримы с параметрами электростанций. Отличительной особенностью самолетных АЭС является высокая плотность компоновки. Обеспечение работоспособности и надежности АЭС и ПНК с таким уровнем параметров является чрезвычайно сложной задачей.

Поскольку основным назначением АЭС является создание электроэнергии, невыполнение этого требования считается нарушением работоспособности АЭС. Отсюда следует, что любые отказы систем, узлов или агрегатов АЭС, следствием которых является несоответствие электроэнергии заданным условиям полета АТ, расцениваются как отказы АЭС. Таким образом, надежность силовой АЭС заключается в ее способности обеспечивать необходимую для полета АТ электроэнергию и обуславливается надежностью всех входящих в неё групп, устройств и систем. К каждой из этих групп предъявляются специальные требования по обеспечению надёжности с учетом тяжести последствий при возможных отказах. АЭС является важнейшей частью авиационной техники, и ее отказ приводит к отказу всей систем АТ. С целью уменьшения влияния таких отказов на возможность продолжения полета на самолетах устанавливается несколько энергетических установок на каждом двигателе.

С позиций обеспечения высокого уровня безопасности полетов и безотказности АТ общие требования обеспечения заданного уровня надежности наиболее полно и конкретно сформулированы для самолетов, выполняющих массовые пассажирские и грузовые перевозки, в «Нормах летной годности гражданских самолетов». Энергетическая установка вместе с его системами и агрегатами должна быть спроектирована и изготовлена таким образом, чтобы в ожидаемых условиях эксплуатации в течение назначенного ресурса и срока службы отказы с опасными последствиями, приводящими к возникновению катастрофической ситуации, оценивались за час наработки самолета как собы-

тия практически невероятные. Подтверждение этого понимания должно проводиться на основе анализа конкретной схемы энергетической установки, материалов статистической оценки подобных функций за длительный период эксплуатации, а также результатов испытаний данной конструкции энергетической установки. В частности, должны быть приняты меры по исключению следующих событий: обесточивание самолета в полете; появление опасных последствий при отказе одного генератора; пожар генератора.

К числу недопустимых отказов, которые приводят к катастрофическим последствиям, относят:

- разрушение элементов роторов генератора, обломки которых не удерживаются внутри корпуса (нелокализованные разрушения);
- нелокализованные пожары;
- отказы, исключающие возможность выключения двигателя.

Кроме общих требований по обеспечению безопасности полетов к современным генераторам предъявляются специальные требования по обеспечению их безотказности и долговечности, по топливно-экономической эффективности, т.е. по  $C_{уд}$ , удобству и минимальным трудозатратам на техническое обслуживание и ремонт, уровню шума и эмиссии вредных веществ.

К требованиям, предъявляемым к энергетическим системам самолетов, относятся: локализуемость последствий разрушения вращающихся частей генераторов, минимальный уровень шума и загрязнения окружающей среды, минимальное число генераторов на пассажирских самолетах и другие, определенные Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) и комитетом по контролю за уровнем шума и загрязнением окружающей среды.

В соответствии с правилами ИКАО все создаваемые пассажирские суда, их силовые установки и бортовое оборудование подлежат обязательной сертификации, т.е. подтверждению их соответствия заданным требованиям на основе результатов специальных стендовых и летных испытаний. Выдаваемый при наличии положительных результатов сертификат — документ о соответствии объекта предъявляемым требованиям, является основанием для начала эксплуатации объекта и перевозки пассажиров.

Общие и специальные требования непрерывно уточняются и усложняются по мере возрастания требований к дальнейшему повышению уровня безотказности полета.

## **2.7. Основные направления совершенствования АЭС и ПНК и повышения уровня их надежности**

Основными показателями, характеризующими конструктивное совершенство АЭС и ПНК, являются потребляемая электроэнергия и затраты на техни-

ческую эксплуатацию. Удовлетворение этих требований осуществляется путем снижения и энергетических затрат и затрат на техническую эксплуатацию. В результате усложняются способы обеспечения заданного уровня надежности как составных частей энергетических установок, так и АЭС и ПНК в целом. Таким образом, четко определяется взаимосвязь конструктивного совершенства и уровня надежности. Для решения этой проблемы на разных стадиях развития АЭС и ПНК проводятся работы по созданию новых высоконадежных материалов и комплектующих деталей и разрабатываются более эффективные технологические процессы.

Проблема создания надежных АЭС и ПНК возникла с самых первых этапов разработки и применения АЭС и ПНК. Способы и уровень ее решения во многом определялись свойствами материалов, возможностями технологии и эффективностью результатов научно-исследовательских работ. Реальное создание надежных КИ АЭС и ПНК стало возможным только в 40-х годах благодаря достижениям в области авиационной технологии, металлургии и созданию новых материалов и комплектующих изделий.

Для обеспечения необходимого уровня безотказности и долговечности АЭС и ПНК проводилась отработка их основных частей: пилотажного комплекса, навигационного комплекса, систем электроснабжения. Особое внимание уделялось обеспечению устойчивости систем энергоснабжения и надежности систем регулирования и управления. Дальнейшим достижением отечественного самолетостроения было создание и внедрение в эксплуатацию автоматизированных систем управления самолетом и бесконтактных генераторов переменного тока повышенной мощности и экономичности с большим ресурсом и хорошей эксплуатационной надежностью. Уровень надежности генераторов зависит главным образом от технического совершенства всех его частей.

Уровень надежности АЭС и ПНК первого поколения исчисляется тысячами летных часов. Это было достигнуто благодаря разработке и внедрению таких устройств, как, например, приемники воздушного давления ПВД-1М, указатели скорости КУС-730/1100, вариометры ВАР-30, радиокompасы АРК-15, радиостанции «Баклан», емкостные топливомеры и др. Для измерения вибрации двигателей были применены пьезоэлектрические датчики. Были проведены специальные исследования по тщательной отстройке пьезоэлектрических датчиков от резонансных колебаний усилителей аппаратуры измерения вибрации. Особое внимание уделялось совершенствованию генераторов систем электроснабжения ВС.

При создании новых поколений генераторов особое внимание уделяется решению следующих вопросов:

- разработке оптимальных способов возбуждения генераторов;

- разработке несущих конструкций и ротора генератора повышенной жесткости, обеспечивающих сохраняемость радиальных и осевых зазоров на рабочих режимах;
- разработке бесконтактных, бесщеточных генераторов;
- обеспечению эффективного охлаждения генераторов;
- разработке генераторов повышенной мощности;
- повышению уровня эксплуатационной технологичности и сокращению трудоемкости обслуживания генераторов;
- улучшению контролепригодности генератора и его основных частей.

В процессе создания новых генераторов выполняется большой комплекс испытаний по отработке и оценке надежности, а также стендовых и летных испытаний, предусмотренных требованиями норм летной годности (НЛГ). С целью подтверждения соответствия двигателей требованиям НЛГ проводятся их сертификационные испытания, включающие в себя специальные стендовые испытания и испытания по установлению ресурса. В состав сертификационных испытаний включаются 150-часовые стендовые испытания по проверке надежности генератора и его пригодности к летной эксплуатации, а также испытания по установлению первоначально назначенного ресурса на основе эквивалентно-циклических испытаний двигателя в целом и его основных частей. В общий объем сертификационных испытаний включаются летные испытания по проверке устойчивости работы генератора на различных режимах работы силовой установки, оценке эффективности систем регулирования и управления. В процессе летных испытаний также проверяется работоспособность аварийных, вспомогательных и защитных систем (противопожарных, противообледенительных и др.). Для оценки нагруженности генератора и его основных частей определяют их вибрационные, тепловые и прочностные характеристики с оценкой распределения времени работы генератора на основных регламентированных режимах, т.е. оценивают циклы нагружения.

При испытаниях генераторов совместно с двигателем и самолетом определяются полетные циклы нагружения генератора с проверкой работоспособности генератора и его систем на установившихся и переходных режимах и оценкой устойчивости, экономических и эксплуатационных характеристик генератора в компоновке силовой установки самолета.

## **2.8. Реализованные уровни надежности АЭС и ПНК**

Сравнение и оценка показателей надежности генераторов должны проводиться с учетом их конкретных стадий создания, испытания, производства и длительности эксплуатации, при этом особое значение имеет фактический объем наработки парка генераторов. Показатели надежности должны быть привязаны к определенным календарным периодам эксплуатации с учетом

выполнения работ по устранению выявленных недостатков. С этой точки зрения необходимо осторожно подходить к оценке «средних» данных по надежности генераторов за длительный период их эксплуатации, так как обычно в течение такого периода в конструкцию отдельных агрегатов и систем и в технологию их изготовления вносятся многие изменения, а иногда даже создаются практически новые модификации.

Так, например, в ходе доводки генератора ГТ-40ПЧ-6 было разработано и внедрено 320 мероприятий по повышению надежности и ресурса. При летных испытаниях только в течение одного года было 44 случая отказа генератора при снижении режима до полетного малого газа, 28 случаев отказа генератора при запуске двигателя на земле, а также много случаев разрушений подшипников ротора, отказов аппаратуры регулирования и управления. В результате конструктивных и технологических доработок к концу третьего года эксплуатации надежность генераторов была доведена до приемлемого значения, которое было принято в качестве исходного при дальнейшем усовершенствовании генератора.

В результате работ по внедрению цифровой электронной системы управления самолетом и двигателем (регулирование температуры газа и частоты вращения ротора), доработке гидромеханического блока топливного насоса и установке регулятора расходов воздуха, поступающего в наружный и внутренний контуры двигателя, частота возникновения отказов АЭС и ПНК была доведена до 0,15—0,20 на 1000 часов налета. Опыт эксплуатации показывает, что с увеличением длительности эксплуатации происходит постоянное снижение коэффициентов  $K_{1000}$  ВП и  $K_{1000}$  ДС.

Влияние надежности АЭС и ПНК на безопасность полета характеризуется следующими данными. Согласно данным ИКАО за 1980–1985гг. на пассажирских самолетах авиакомпаний, входящих в ИКАО, среднее число катастроф по техническим причинам (ошибки техники пилотирования, отказы авиатехники, метеословия и др.) на регулярных пассажирских линиях составило примерно 0,1 на 100 тыс. часов налета, т.е. 1 катастрофа на 1 млн. часов. При этом за 1 год из общего числа всех причин около 40% катастроф шло из-за отказов техники, в том числе около 20% – из-за отказа двигателей.

## **2.9. Тенденции развития работ в области надежности АЭС и ПНК**

При создании новых поколений АЭС и ПНК наиболее полно должны быть использованы достижения в области проектирования, конструирования и технологии производства АЭС и ПНК. Особое внимание будет уделяться решению следующих вопросов:

- улучшению параметров рабочего процесса, включая создание АЭС и ПНК с изменяемым циклом;

- применению новых высоконадежных материалов, включая композиционные материалы и специальные защитные покрытия;
- созданию высокоэффективных диагностических систем;
- улучшению согласования характеристик АЭС и ПНК и планера;
- дальнейшему улучшению эксплуатационных характеристик АЭС и ПНК путем повышения уровня их безотказности, долговечности и эксплуатационной технологичности.

Степень надежности АЭС и ПНК и их эксплуатационного качества обеспечиваются главным образом безотказностью, состоянием АЭС и ПНК.

Генератор является наиболее напряженным узлом АЭС и ПНК в связи с отбором от генератора большой мощности, сложности изготовления и необходимости эффективной системы охлаждения генератора в целом.

В связи с этим процесс проектирования генератора, его доводка занимают гораздо больше времени по сравнению с другими элементами систем АЭС и ПНК. Поэтому работы по созданию генератора следующего поколения начинаются задолго до принятия решения о создании нового генератора. Это открывает возможность более тщательной отработки новых конструктивных решений, что, в конечном счете, повышает надежность создаваемого генератора. Иными словами, работы по самому генератору могут вестись без привязки к конкретному двигателю. Необходимо также отметить, что один и тот же генератор без существенных изменений может быть использован на разных двигателях и разного назначения, в том числе и для гражданских самолетов.

Имеющийся опыт работ по обеспечению надежности вновь создаваемых комплектующих изделий показывает, что для успешного решения этой проблемы необходимы следующие условия:

- владение теорией и методами аппарата надежности, включая знание закономерностей зависимости уровня надежности от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов;
- умение применять расчетно-аналитические методы определения и оценки надежности на этапах проектирования, испытания и эксплуатации изделий;
- хорошее знание конструкции изделия и его основных частей;
- владение современными методами проектирования и конструирования изделия и его основных частей, методами проведения испытаний, анализа и обобщения опыта создания и эксплуатации прототипов или аналогов изделия;
- освоение необходимого объема знаний в области материаловедения и технологии, включая рациональный выбор материалов, технологических процессов для обеспечения надежности;
- знание основных правил, методов и средств, применяемых при эксплуатации изделий.

## 2.10. Законы распределения случайных величин

Законы распределения отказов, являющихся случайными величинами, имеют большое значение для теории и практики работ по надежности комплектующих изделий. Знание этих законов позволяет рассчитывать и прогнозировать надежность изделий на этапах их проектирования и эксплуатации; особенно большое значение эти законы имеют при оценке правильности установления и продления ресурсов.

Наибольшее значение для надежности имеют законы: биномиальный и Пуассона – для дискретных величин; экспоненциальный, Вейбулла и нормальный – для непрерывных величин. Кроме того, используются два вспомогательных закона –  $\chi$ -квадрат и  $\gamma$ -распределение. Для сложных и многофункциональных распределений применяются композиции указанных законов распределения и усеченные законы распределения.

### *Биномиальное распределение*

Это распределение может быть получено, если в качестве случайной величины взять число отказов, возникающих в процессе эксплуатации комплектующих изделий в одинаковых условиях, т.е. когда равновероятно появление отказов в любом периоде времени.

Если  $q$  – вероятность появления отказа КИ ( $q = \text{const}$ ),  $n$  – число эксплуатируемых КИ,  $m$  – возможное число отказов при  $n$  изделий (отказ  $m$  изделий), то вероятность  $q_{m,n}$  появления отказа  $m$  изделий из  $n$  числа эксплуатируемых КИ, т.е. вероятность рассматриваемой случайной величины  $X$ , определится по формуле Бернулли

$$P(X = m) = q_{m,n} = C_n^m \cdot q^m (1 - q)^{n-m}, \quad (2.24)$$

где возможное число отказов  $m = 0, 1, 2, \dots, n$ ;  $C_n^m$  – число всех возможных сочетаний, которое можно образовать из  $n$  КИ, собирая из них  $m$  отказов:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Практическое применение биномиального закона:

- статистический контроль качества выборки КИ, составляющий не более 10% объема партии;
- определение количества отказов неремонтируемых КИ в течение заданного времени при их испытаниях.

При очень малых значениях  $q < 0,1$  биномиальное распределение может быть заменено распределением Пуассона, а при больших значениях  $nq > 20$  – нормальным распределением.

### *Распределение Пуассона*

Распределение Пуассона, или закон редких явлений, так же, как и биномиальное распределение, распространяется на те случаи, в которых случайная величина принимает целые и положительные значения.

Физический смысл распределения Пуассона такой же, как и биномиального, т.е. оно определяет вероятность появления в малых выборочных значениях случайной величины  $m$ .

Эта вероятность рассчитывается по формуле

$$P(X = m) = g_{m,n} = \frac{a^m}{m!} e^{-a}. \quad (2.25)$$

Распределение Пуассона можно использовать двояко:

- как заменитель биномиального распределения. В этом случае  $a = qn$ , где  $n$  – число эксплуатируемых КИ (количество изделий в выборке);  $q$  – вероятность появления отказа единичного КИ;

- при выполнении расчетов по надежности и при эксплуатации ремонтируемых КИ, для которых распределение Пуассона имеет самостоятельное значение. В частности, для ремонтируемого КИ при установившемся режиме работы случайное значение отказов в единичном изделии распределено по закону Пуассона. В этом случае  $a = M$ , т.е. равно математическому ожиданию, т.е. среднему числу отказов, приходящемуся на одно КИ при эксплуатации:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n},$$

где  $m$  – число отказов, которое было выявлено при эксплуатации в случае  $i$ ;  $n$  – число КИ.

Правильность предположения о наличии распределения Пуассона подтверждается опытным путем: найденные при эксплуатации статистические величины  $M(x)$  и  $D(x)$  должны быть равны между собой.

При  $m = 0$  распределение Пуассона трансформируется в экспоненциальное распределение.

### *Экспоненциальное распределение*

Экспоненциальный закон – один из основных законов распределения продолжительности срока службы технических устройств.

В качестве основного параметра экспоненциального распределения используется  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов для неремонтируемых КИ и параметр потока отказов  $\omega(t)$  – для ремонтируемых КИ (только на установившихся режимах для внезапных отказов, связанных с износом или старением элементов КИ). Для неремонтируемых КИ  $\lambda(t)$  показывает, какая доля работающих в мо-



мент времени  $t$  КИ выходит из строя в единицу времени после момента  $T$ . Если

в выражении для вероятности безотказной работы  $P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$  предположить, что величина постоянная  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ , где  $t$  – наработка до отказа (или между отказами), что соответствует периоду нормальной эксплуатации, то получим графики экспоненциального распределения, приведенные на рис. 4.

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.26)$$

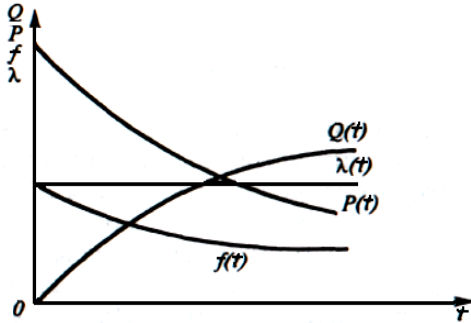


Рис. 4. Графики экспоненциального распределения, содержащие зависимость от времени наработки основных характеристик надежности

Учитывая, что  $f(t) = P(t) \cdot \lambda(t)$ , имеем плотность распределения длительности срока службы КИ

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (2.27)$$

Из выражений (2.3) и (2.27) следует, что вероятность отказа (или функция экспоненциального распределения) равна

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (2.28)$$

Учитывая выражение (2.15)  $\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}$  и то, что  $\lambda = \text{const}$ , имеем

$$\text{const} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}. \quad \text{Это соответствует условию постоянства относительной}$$

скорости уменьшения по времени величины вероятности безотказной работы. Поскольку среднее время наработки до отказа  $T_{cp}$  в соответствии с выражением (2.20)  $T_{cp} = 1/\lambda$ , то можем записать (см. (2.26)):

$$P(t) = e^{-t/T_{cp}} \quad \text{и} \quad Q(t) = 1 - e^{-t/T_{cp}}.$$

Так как  $T_{cp} \ll 1$ , имеем  $e^{-X} \cong 1 - X$ ;  $P(t) = 1 - \frac{t}{T_{CP}}$ ;  $Q(t) = \frac{t}{T_{CP}}$ , где  $t$  – время полета. Примечательно, что при экспоненциальном законе надежности

достаточно иметь среднюю наработку до отказа, чтобы определить вероятность безотказной работы в любой момент времени. Экспоненциальный закон описывает надежность КИ только при внезапном характере отказов, не связанном с предыдущей работой изделий. На практике часто бывает так, что экспоненциальный закон не имеет места  $\lambda(t) \neq \text{const}$  но и в этом случае его можно применять для ограниченных отрезков времени. Это допущение оправдывается тем, что при ограниченном периоде времени переменную интенсивность отказов без большой ошибки можно заменить средним значением  $\lambda_{\text{CP}}$ , т.е.  $\lambda(t) \approx \lambda_{\text{CP}}$ .

### *Распределение Вейбулла*

Двухпараметрическое распределение Вейбулла является более гибким, чем экспоненциальное, которое может рассматриваться как частный случай первого. Это распределение получено эмпирически.

Плотность распределения Вейбулла

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-t^m/t_0} \quad (2.29)$$

При  $1/t_0 = \lambda$  и  $m = 1$  уравнение (2.29) превращается в (2.27) для плотности вероятностей экспоненциального закона распределения. Величина  $m$  – переменный параметр, имеющий разные значения, которые подбираются в результате обработки статистических данных.

При описании участка приработки  $m < 1$ , участка износа  $m > 1$ , участка нормальной эксплуатации  $m = 1$ ;  $t_0$  – параметр, связанный со средней наработкой до отказа  $T_{\text{CP}}$  уравнением

$$t_0 = \left( \frac{T_{\text{CP}}}{b_m} \right)^m \quad \text{и} \quad b_m = \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) = \int_0^{\infty} u^{1/m} \lambda^{-u} du \quad - \text{ гамма-функция.}$$

Интегрируя выражение (2.29) от 0 до 1, получаем функцию распределения  $F(t) = Q(t)$ :

$$Q(t) = 1 - e^{-t^m/t_0}, \quad (2.30)$$

$$P(t) = e^{-t^m/t_0}. \quad (2.31)$$

Следовательно

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{m}{t_0} t^{m-1}. \quad (2.32)$$

Средняя наработка до отказа

$$T_{\text{CP}} = \int_0^{\infty} e^{-t^m/t_0} dt = t_0^{1/m} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right). \quad (2.33)$$

На рис. 5 показаны графики распределения Вейбулла.

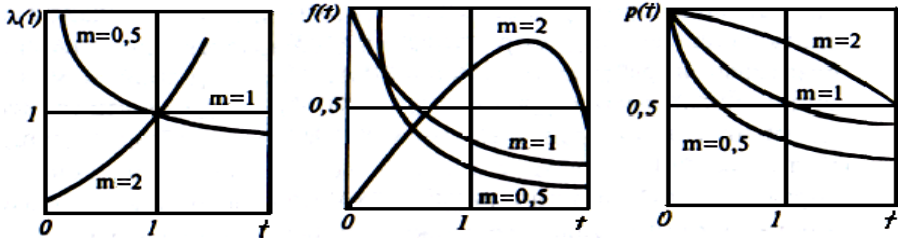


Рис. 5. Графики распределения Вейбулла при различных значениях параметра  $m$  на различных этапах эксплуатации

### *Нормальное (гауссово) распределение*

Главная особенность нормального распределения состоит в том, что оно является предельным, к которому приближаются другие законы распределения. Можно показать, что сумма большого числа независимых случайных величин, подчиненных каким угодно законам распределения, приближенно подчиняется нормальному закону распределения. При этом основное ограничение состоит в том, чтобы все величины в общей сумме имели относительно малое значение.

В отличие от экспоненциального распределения и распределения Вейбулла, которые применимы только для положительных непрерывных случайных величин, нормальное распределение применимо для непрерывных случайных величин, которые могут принимать любые значения от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Плотность нормального распределения определяется формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (2.34)$$

Графики изменения плотности нормального распределения приведены на

рис. 6. В частном случае, когда  $m_x = 0$  и  $\sigma_x = 1$ , имеем  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$  и при  $x = 1$   $f(x) = 0,3989$ ,  $x = 2$   $f(x) = 0,2420$ ,  $x = 3$   $f(x) = 0,0540$ ,  $x = 4$   $f(x) = 0,0044$ ,  $x = 5$   $f(x) = 0,0001$ .

Таким образом, при  $x > 3\sigma$  величина  $f(x)$  имеет очень малые значения и поэтому при анализе характеристик распределения часто ограничиваются приближенными значениями  $f(x)$  только до  $x = 3\sigma$  (правило трех сигм).

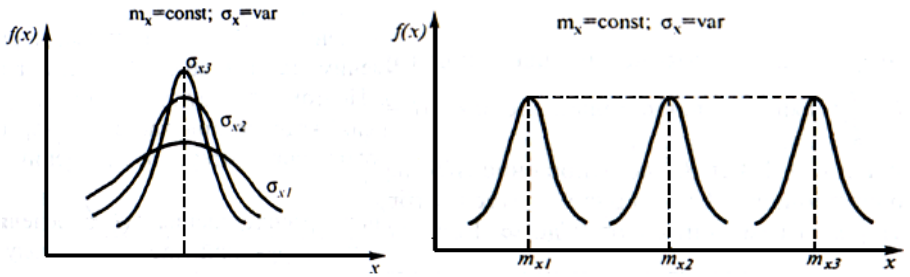


Рис. 6. Графики изменения плотности нормального распределения

Функция распределения  $F(x)=Q(x)$  определяется через плотность распределения

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx . \quad (2.35)$$

В задачах надежности для оценки распределения продолжительности срока службы (времени наработки до отказа) нормальный закон в чистом виде не применим, так как время  $t$  не может принимать отрицательные значения. Поэтому пользуются понятием усеченного нормального распределения, которое получается из нормального при условии ограничения возможного интервала изменений случайной величины от 0 до  $+\infty$ .

Плотность усеченного распределения  $f(t)$  определяется из условия  $f(t) = c \cdot f(t)$ ,

где  $c$  – нормирующий множитель, получаемый из условия

$$c \int_0^{\infty} f(t)dt = 1 .$$

Смысл множителя  $c$  можно пояснить с помощью рис. 7, из которого видно, что вся площадь под гауссовой кривой  $A + B = 1$ . Но  $B = \int_0^{\infty} f(t)dt < 1$ , следова-

тельно, если  $c \cdot B = 1$ , то величина  $c$  всегда больше 1 и  $c = 1 + A/B$ , где отношение  $A/B$  характеризует относительную долю площади  $A$  под кривой Гаусса, отбрасываемой при ограничении интервала изменения  $t$  от 0 до  $\infty$ . Если коэф-

фициент вариации  $v_i = \frac{\sigma_i}{m_i} < 0,5$ , то величина отношения  $A/B$  мала и  $c \sim 1$ .

Тогда можно считать, что  $f(t) = f(t)$  с достаточной для практических расчетов точностью, и пользоваться неусеченным нормальным распределением для описания распределения времени безотказной работы.

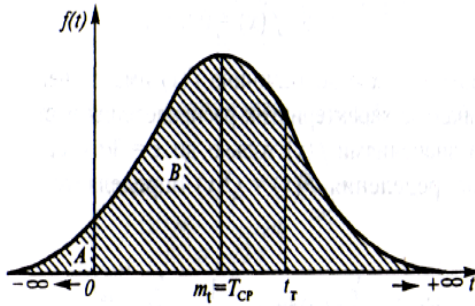


Рис. 7. График к понятию об усеченном нормальном распределении

В практических задачах надежности АЭС и ПНК коэффициент вариации значительно меньше 0,5 и поэтому можно считать  $c = 1$ .

Вероятность отказа  $Q(t)$  в случае  $c = 1$  равна площади под кривой Гаусса, лежащей левее  $t$  (см. рис. 6) и определяется по формуле (2.35), в которой величина  $x$  заменяется на время  $t$ .

Соответственно вероятность безотказной работы

$$P(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} dt. \quad (2.36)$$

Интенсивность отказов, учитывая (1.12), (1.59) и (1.61),

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}}}. \quad (2.37)$$

Интегралы в уравнениях (2.36)...(2.37) в конечном виде не берутся. Они вычисляются с помощью табулированной функции вида

$$F_0(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^k e^{-\frac{k^2}{2}} dk, \quad (2.38)$$

где  $k = \frac{t-m_t}{\sigma}$ , для которой составлены таблицы.

Учитывая равенство (2.38), выражение (2.35) при  $x = t$  можно записать

$$Q(t) = F_0 \frac{t-m_t}{\sigma_t}.$$

Графики нормального распределения показаны на рис. 8.

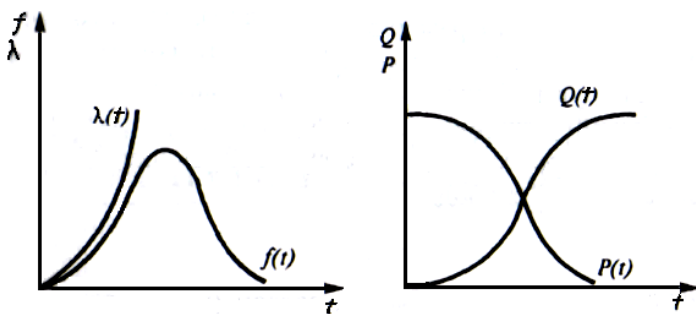


Рис. 8. Графики нормального распределения

### ***Распределение $\chi$ -квадрат***

Это распределение используется для оценки согласованности законов теоретического и экспериментального распределений. Критерий согласований (критерий « $\chi$ -квадрат») обычно записывается так:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - M_i)^2}{M_i}, \quad (2.39)$$

где  $k$  – число групп или разрядов (интервалов), на которые разбиваются статистические данные;  $m_i$  – число наблюдений изучаемого события, попавших в  $i$ -ю группу (число отказов);  $M_i$  – математическое ожидание числа событий (отказов) в  $i$ -й группе.

Для распределения  $\chi$ -квадрат введен особый параметр, называемый числом степеней свободы:

$$r = k - s, \quad (2.40)$$

где  $s$  – число независимо наложенных связей (число параметров) закона распределения.

Для распределения  $\chi$ -квадрат составлены специальные таблицы.

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ КИ (на примере МГВ-1СК АБСУ-154-2)

Эксплуатационная надёжность – важнейшее свойство изделий, определяющее их способность нормально функционировать в заданных условиях эксплуатации. Задачи анализа надёжности решаются как на этапе создания новой техники, так и в процессе её эксплуатации. Они наиболее актуальны для сложных и ответственных технических устройств. Анализ эксплуатационной надёжности служит основой для обоснования мероприятий по совершенствованию технологических процессов ТОиР и конструкции объектов. Задачи анализа надёжности, решаемые при установлении причин возникновения отказов, раскрываются наиболее полно при рассмотрении находящихся в эксплуатации объектов в виде невозстанавливаемой системы.

В состав работ, выполняемых при анализе надёжности, входят:

1. Качественный анализ надёжности.
2. Количественный анализ надёжности.
3. Исследование причин появления дефектов.
4. Разработка мероприятий по повышению надёжности.

#### Качественный анализ эксплуатационной надёжности АБСУ-154-2

Результаты выполнения анализа надёжности во многом зависят от представительности статистических данных об отказах и неисправностях заданного объекта. Статистические данные представлены в виде табл. 1.

Таблица 1. Отказы блоков системы АБСУ-154-2 на самолетах Ту-154

№ п/п	Наименование КИ	Повторяемость / наработка на отказ в часах	Обстоятельства обнаружения	Причина	Классификация
1	2	3	4	5	6
1	РА-56В1	9, 71, 1651, 2440, 2632 4865, 5407, 5539, 6225 7121, 7726, 5875, 10000 12007, 12157, 6900	Гаснет табло «ИСПР АБСУ», загорается «РА». Падение давления	Отказ реле. Внутренние утечки	Э Э
2	МГВ-1СК	88, 630, 1386, 1748, 1789, 1826, 1897, 2173, 2406, 2437, 2901, 3158, 3592, 3624, 3875, 4238, 5072, 5341, 5655, 6596, 6903	Не арретируется. Не горит «ИСПР. АБСУ» Выпал бленкер на ПКП	Плохая работа мотора коррекции. Механическое повреждение	КПН Э
3	ПУ-46	291, 986, 346, 2581, 4918, 5479, 6030, 6580, 10264	Не отключается стабилизация Н ; М ; V	Неисправность МКВ. Неиспр. кнопки. Обрыв в цепи	Э КПН Э

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
4	СНП-1	18, 240, 3537, 5688, 5787, 6690, 6962, 8082, 13437	Горит табло «ОТКАЗ МГВ»	Неисправны пороговые устройства. Неиспр комм. реле	Э  Э
5	ПН-5	96, 780, 1475, 2168, 2422, 2556, 6097	Не вкл. кнопка «Сброс прогр.». Нет захвата глиссады	Плохой кон- такт. Пробит диод	Э Э
6	КГ-7	1111, 4426, 8456	Отказ БАП-3	Неисправен ДУ. Пробит диод	Э Э
7	ВКВ-2	241, 1266, 1619, 3996,9399	Запах гари.  Не вкл. реж. «Н»	Сгорел блок питания БПН-5-1. Неиспр. реле РЗ	Э Э
8	БА-18	1201, 2556	Откл. режима управления АТ-6	Отказ УНЧ-027	Э
9	БИС-2	302, 624, 7723, 10770,10785	«ИСПР АБСУ» гаснет, горит отказ «БНС№4»	Отказ СН- 11М-2 Отказ усил. УР-9	Э Э
10	ВУ-1-2	651, 1469, 2533, 4559,6035, 19961	Горит отказ ВУ. Нет тест-контр.	Пробой диода. Отказ реле	Э Э
11	БУ-65	14, 3462, 3683, 3748, 5888, 7522	Не откл. от КБО Отказ прод. ка- нал Не вкл. бок. канал	Отказ реле. Пробой дио- да	Э Э
12	КЗСП	3183, 4216, 5368	Отсутствует стабилизация по скорости	Неисправен усилитель УСО-2	Э
13	ЗВГ-15	1098, 2133	Прошёл отказ 3-х РА (1,2,3 п/к)	Некачествен- ный ремонт самолёта. Отказ выкл. пит.	Плохой ремонт
14	КМ-15	2015	Сломана кре- мальера	Небрежная эксплуатация	Э
15	БВК-10	7844	Погасло табло «ИСПР АБСУ»	Отказ УР-9	Э



1	2	3	4	5	6
16	БСН-7	3929, 8723	Высвечивается табло «БДГ»	Отказ СН-11	Э
17	БАП-6	1661	Гаснет «ИСПР АБСУ»	Разные сигналы с блоков	Э
18	МКВ-45	8496	Скорость пере- кладки стабили- затора в 2 раза меньше	Неисправен МКВ	Э
19	БКН-5	610, 4788, 6655	Не вкл. режим НВУ. Разница по курсу на ПНП >10град	Отказ реле	Э

Наиболее часто отказывают следующие блоки АБСУ: МГВ-1СК, РА-56, ПУ-46, СНП-10, ВКВ-2 и др. На основе статистических данных, представленных в виде таблицы, можно сделать следующие выводы: неисправности АБСУ-154-2 происходят как из-за конструктивных факторов, так и по причине несоблюдения норм технического обслуживания и ремонта; наиболее часто отказы происходят из-за эксплуатационных факторов.

### Количественный анализ эксплуатационной надёжности АБСУ-154-2

Количественный анализ надёжности заключается в определении теоретического закона распределения наработки объекта до отказа и его параметров. Определяется фактическая надёжность объекта в пределах назначенного ресурса, а также необходимость проведения мероприятий, направленных на повышение уровня надёжности.

Количественный анализ надёжности включает:

1. Расчёт эмпирических параметров надёжности.
2. Определение теоретического закона распределения наработки на отказ и его параметров.
3. Определение фактической надёжности КИ.
4. Разработку мероприятий, направленных на повышение надёжности КИ.

Исходными данными для проведения количественного анализа надёжности являются:  $t_a$  – общая продолжительность эксплуатации КИ (ресурс);  $N$  – общее число эксплуатируемых КИ;  $n$  – число отказавших КИ за время наблюдения;  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  – наработка КИ до отказа.

Расчет произведён с помощью ЭВМ.

## Расчёт эмпирических параметров надёжности

Из табл. 1 выбираем статистические данные по отказам самого ненадежного КИ – МГВ-1СК в порядке возрастания. Общее время наблюдения эксплуатации КИ разбиваем на 7 интервалов равной длительности таким образом, чтобы в каждый интервал попало не менее 1 отказа. Результаты расчёта и исходные данные занесены в табл. 2.

Расчёт эмпирических параметров надёжности производится с помощью следующих формул:

$$f_i(t) = \frac{\Delta n_i}{N \cdot \Delta t_i} ; \quad \lambda_i(t) = \frac{\Delta n_i}{(N - n_i) \cdot \Delta t_i} ; \quad P_i(t) = \frac{f_i(t)}{\lambda_i(t)},$$

где  $N$  – общее число отказов;  $\Delta n_i$  – число отказов на интервале  $\Delta t_i$ ;  $n_{i-1}$  – суммарное число отказов по интервалам, предшествующим рассматриваемому.

Наибольшее количество отказов АБСУ приходится на гировертикаль МГВ-1СК. Общее количество МГВ-1СК – 100 штук. Время наблюдения 7000 часов. Ряд наработки до отказа: 88, 630, 1386, 1748, 1789, 1826, 1897, 2173, 2406, 2437, 2901, 3158, 3592, 3624, 3875, 4238, 5072, 5341, 5655, 6596, 6903.

Таблица 2. Показатели надёжности МГВ-СК

№ п/п	$t_i ; t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$\Delta n_i$	$f(t)$	$\lambda(t)$	$P(t)$
1	0-1000	1000	2	2·10E-5	2·10E-5	1
2	1000-2000	1000	5	5·10E-5	5,1·10E-5	0,980
3	2000-3000	1000	4	4·10E-5	4,3·10E-5	0,932
4	3000-4000	1000	4	4·10E-5	4,49·10E-5	0,891
5	4000-5000	1000	1	1·10E-5	1,18·10E-5	0,847
6	5000-6000	1000	3	3·10E-5	3,57·10E-5	0,840
7	6000-7000	1000	2	2·10E-5	2,47·10E-5	0,809

### Определение теоретического закона распределения отказов и его параметров

По данным табл. 2 строим и анализируем гистограммы (рис. 9).

По виду гистограмм можно выдвинуть гипотезу о том, что закон распределения отказов МГВ-1СК близок к логарифмически-нормальному закону. Логарифмически-нормальное распределение имеет два параметра  $m_i$  и  $\sigma_i$ . По

методу разделяющих разбиений имеем:  $m_i = \frac{\ln t_1 z_1 - \ln t_2 z_1}{z_1 - z_2}$ ;  $\sigma_i = \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{z_2 - z_1}$ .

Выбираем  $t_1 = 1000$  ч и  $t_2 = 6000$  ч, тогда  $Q(t_1) = 1 - P(t_1) = 1 - 0,99 = 0,001$ , а  $Q(t_2) = 1 - P(t_2) = 1 - 0,825 = 0,176$ . Для нормального распределения имеем:  $z_1 = -3,1$ ;  $z_2 = -0,93$ . Тогда:  $m_i = 9,467$ ;  $\sigma_i = 0,825$ .

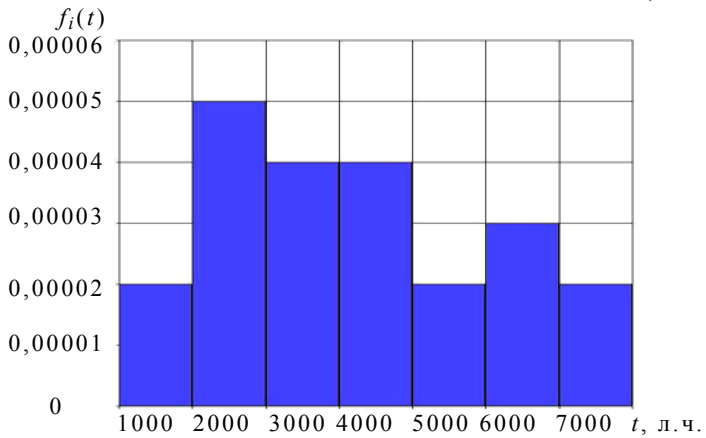
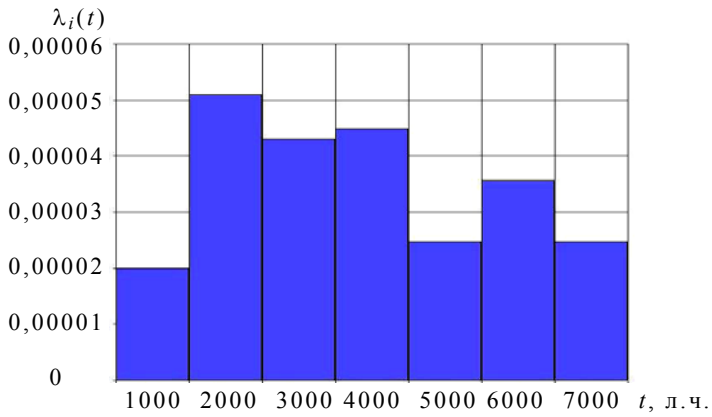
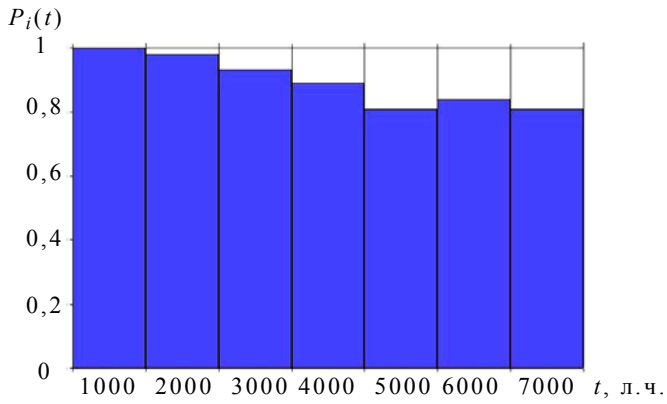


Рис. 9. Графики статистического распределения параметров надежности МГВ-1СК

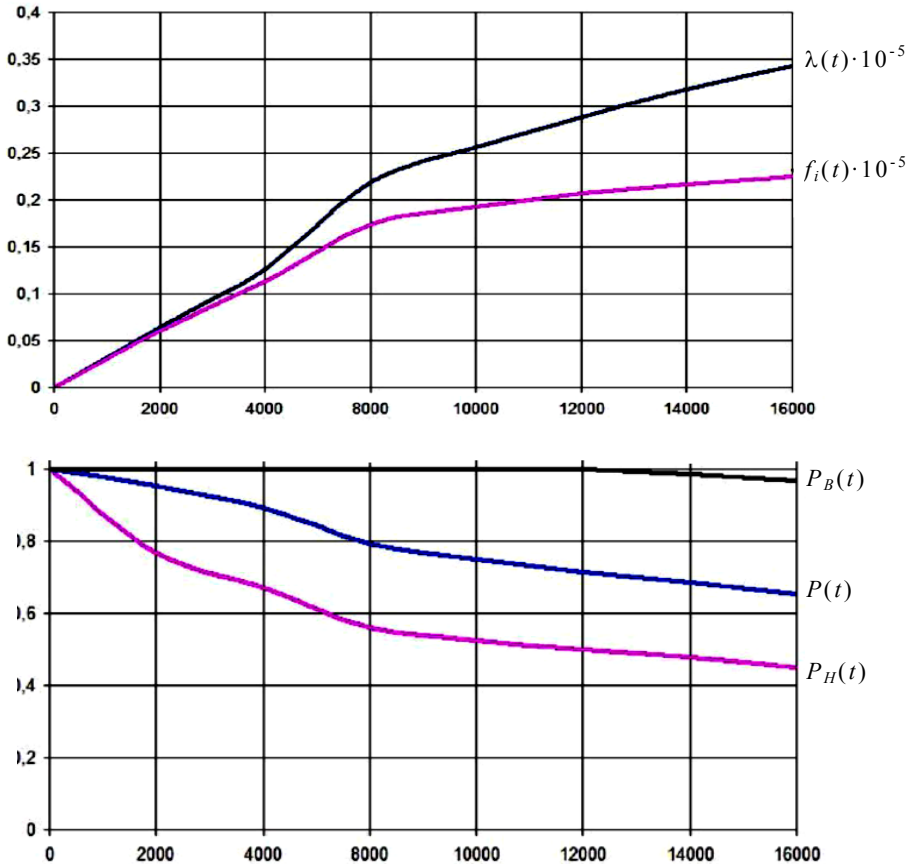


Рис. 10. Графики теоретического распределения надежности МГВ-1СК

Оценки математического ожидания и среднеквадратичного отклонения будут соответственно:  $m_t = 18166,1$  часов;  $\sigma_t = 17938,64$  часов.

### Проверка правильности выдвинутой гипотезы

Сходимость теоретического и статического распределений определяем с помощью критерия  $\chi^2$  (табл. 3). Для уровня значимости  $d = 1\%$  и числа степеней свободы  $r = 8 - 3 = 5$  критическая область будет иметь интервал  $15,10 \div \infty$ . Так как подсчитанное значение критерия не попадает в критическую область, то принятая гипотеза не противоречит статистическим данным.

Таблица 3. Значение функции распределения  $\chi^2$

Число степеней свободы $\Gamma$	Доверительная вероятность												
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	$0,39 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$0,98 \cdot 10^{-3}$	$0,39 \cdot 10^{-2}$	0,016	0,064	1,64	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88	
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	0,446	3,22	4,51	5,98	7,38	9,21	10,60	
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,000	4,64	6,25	7,81	9,35	11,30	12,80	
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,060	1,650	5,99	7,78	9,49	11,10	13,30	14,90	
5	0,412	0,554	0,831	1,150	1,610	2,340	7,29	9,24	11,10	12,80	15,10	16,70	
6	0,676	0,872	1,240	1,640	2,200	3,070	8,56	10,60	12,60	14,40	16,80	18,50	
7	0,989	1,240	1,690	2,170	2,830	3,820	9,80	12,00	14,10	16,00	18,50	20,30	
8	1,340	1,650	2,180	2,730	3,490	4,590	11,00	13,40	15,50	17,50	20,10	22,00	
9	1,730	2,090	2,700	3,330	4,170	5,380	12,20	14,70	16,90	19,00	21,70	23,60	
10	2,160	2,560	3,250	3,940	4,870	6,180	13,40	16,00	18,30	20,50	23,20	25,20	
11	2,600	3,050	3,820	4,570	5,580	6,990	14,60	17,30	19,70	21,90	24,70	26,80	
12	3,070	3,570	4,400	5,230	6,300	7,810	15,80	18,50	21,00	23,30	26,20	28,30	
13	3,570	4,110	5,010	5,890	7,040	8,630	17,00	19,80	22,40	24,70	27,70	29,80	
14	4,070	4,660	5,630	6,570	7,790	9,470	18,20	21,10	23,70	26,10	29,10	31,30	
15	4,600	5,230	6,260	7,260	8,560	10,30	19,30	22,30	25,00	27,50	30,60	32,80	
16	5,140	5,810	6,910	7,960	9,310	11,20	20,50	23,50	26,30	28,80	32,00	34,30	
18	6,260	7,010	8,230	9,390	10,90	12,90	22,80	26,00	28,90	31,50	34,80	37,20	
20	7,430	8,260	9,590	10,90	12,40	14,60	25,00	28,40	31,40	34,20	37,60	40,00	

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
22	8,640	9,540	11,00	12,30	14,00	16,30	27,30	30,30	33,90	36,80	40,30	42,80
24	9,890	10,90	12,40	13,80	15,70	18,10	29,60	33,20	36,40	39,40	43,00	45,60
26	11,20	12,20	13,80	15,40	17,30	19,80	31,80	35,60	38,90	41,90	45,60	48,30
28	12,50	13,60	15,30	16,90	18,90	21,60	34,00	37,90	41,30	44,50	48,30	51,00
30	13,80	15,00	16,80	18,50	20,60	23,40	36,30	40,30	43,80	47,00	50,90	53,70
35	17,20	17,50	20,60	22,50	24,80	27,80	41,80	46,10	49,90	53,20	57,30	60,30
40	20,70	22,20	24,40	26,50	29,10	32,30	47,30	51,80	55,80	59,30	63,70	66,80
45	24,30	25,90	28,40	30,60	33,40	36,90	52,70	57,50	61,70	65,40	70,00	73,20
50	28,00	29,70	32,40	34,80	37,70	41,80	58,20	63,20	67,50	71,40	76,20	79,50
55	31,70	33,60	36,40	39,00	42,10	46,00	63,60	68,80	73,30	77,40	82,30	85,70
60	35,50	37,50	40,50	43,20	46,50	50,60	69,00	74,40	79,10	83,40	88,40	92,00
65	39,40	41,40	44,60	47,40	50,90	55,30	74,40	80,00	84,80	89,20	94,40	98,10
70	43,30	45,40	48,80	51,70	55,30	59,90	79,70	85,50	90,50	95,00	100,40	104,2
75	47,20	49,50	52,90	56,10	59,80	64,50	85,10	91,10	96,20	100,8	106,4	110,3
80	51,20	53,50	57,20	60,40	64,30	69,20	90,40	96,60	101,9	106,6	112,3	116,3
85	55,20	57,60	61,40	64,70	68,80	73,90	95,70	102,10	107,5	112,4	118,2	122,3
90	59,90	61,80	65,60	69,10	73,30	78,60	101,1	107,60	112,1	118,1	124,1	128,3
95	63,20	65,90	69,90	73,50	77,80	83,20	106,4	113,0	118,8	123,9	130,0	134,2
100	67,30	70,10	74,20	77,90	82,40	87,90	111,7	118,5	124,3	129,6	135,8	140,2

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт предприятия. СТП СГАУ 6.1.4-97. Общие требования к оформлению учебных текстовых документов.
2. Системы запуска авиационных двигателей: метод. указания к практич. работе / сост. И.В. Таммекиви; СГАУ. – Самара, 2002.
3. Писаренко, В.Н. Надежность, контроль и техническая диагностика авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов: учеб. пособие / В.Н. Писаренко. – Самара: Изд-во СГАУ, 2005.
4. Писаренко, В.Н. Техническая эксплуатация и ремонт авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов. Ч. 1: учеб. пособие / В.Н. Писаренко. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007.
5. Рабочая программа по дисциплине «Техническая эксплуатация и ремонт авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов»/ сост. В.Н. Писаренко. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010.

*Учебное издание*

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ  
АВИАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
И ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

*Методические указания к курсовой работе*

Составитель *Писаренко Виктор Николаевич*

Редактор Н. С. К у п р и я н о в а  
Верстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 19.04.2010 г. Формат 60X84 1/16..

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 2,5.

Тираж 30 экз. Заказ .

Самарский государственный аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.



**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
И РЕМОНТ АВИАЦИОННЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
И ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫХ  
КОМПЛЕКСОВ**

**САМАРА 2010**