

Министерство науки, высшей школы  
и технической политики Российской Федерации

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания

Самара 1992

Составитель Б.А.М и л о в

УДК 629.7.017.1-92

Анализ эксплуатационной надежности авиационной техники: Метод. указания /Самар.аэрокосм.ун-т; Сост.Б.А.М и л о в. Самара, 1992. 31 с.

дана методика проведения анализа и производства расчета характеристик надежности изделий авиационной техники при установлении законов распределений отказов и неисправностей для различных планов наблюдений; излагаются также порядок и последовательность выполнения курсовой работы, требования к ее оформлению.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности 13.03. Они могут быть полезны студентам других факультетов, изучающих проблемы надежности технических устройств. Выполнены на кафедре эксплуатации летательных аппаратов и двигателей.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензент Б.А.Х и т о в

## 1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа "Анализ эксплуатационной надежности авиационной техники" выполняется студентами самостоятельно на основе знаний, полученных при изучении курсов "Эксплуатационная надежность авиационной техники", "Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей", "Авиационная техника", общетехнических дисциплин, а также сведений и материалов, собранных студентами во время производственной практики. Основная цель работы - привить студентам навыки самостоятельного выполнения анализа и расчета надежности авиационной техники.

При выполнении курсовой работы студент должен изучить конструкцию, действующие нагрузки и условия работы авиационной техники, регламент технического обслуживания (ТО) летательных аппаратов (ЛА), освоить методы сбора, обработки и анализа отказов и неисправностей, с инженерных позиций сделать выводы и дать рекомендации по обеспечению заданного уровня надежности авиационной техники.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Несмотря на большое разнообразие тематики курсовых работ, что обусловлено многотипностью авиационной техники и возможных отказов и неисправностей, можно выделить характерные основные этапы, определяющие содержание работы. К ним относятся:

1. Изучение конструкции, принципа работы объекта (системы, узла, агрегата), действующих нагрузок, условий его эксплуатации, регламентов и технологии технического обслуживания - 15% объема.

2. Сбор статистических данных по отказам и неисправностям объекта - 10%.

3. Обработка и качественный анализ статистических данных. Выбор объекта для анализа и расчета его надежности - 15%.

4. Выполнение анализа и расчета надежности объекта - 50%.

5. Выводы и рекомендации по обеспечению заданного уровня надежности объекта - 10%.

Курсовая работа состоит из расчетно-пояснительной записки (текстовая часть) и графической части (чертежей), оформляемых в соответствии с требованиями ЕСКД.

Объем пояснительной записки составляет 25-30 листов формата II (А-4), объем графических работ I,0-I,5 листа ватмана формата 24 (А-1).

## 2.1. Требования к оформлению пояснительной записки

Пояснительная записка должна быть написана от руки чернилами, четко, грамотно, без помарок на одной стороне писчего листа (формата II).

Поля страниц должны быть: верхнее - не менее 15 мм, левое - не менее 30 мм, правое - не менее 10 мм и нижнее - не менее 20 мм.

В записке кратко и четко излагается сущность каждого вопроса. При этом следует избегать многословия, переписывания из учебников и других литературных источников общеизвестных положений.

Пояснительная записка состоит из следующих разделов:

титульный лист, задание (выдается кафедрой),

реферат,

содержание,

основная часть,

список использованных источников,

приложения.

На титульном листе указывается кафедра, тема курсовой работы, фамилия, инициалы и группа студента, выполнявшего работу, фамилия, инициалы руководителя работы.

Реферат составляется на отдельном листе в объеме, не превышающем 2500 печатных знаков. Он должен отражать основное содержание работы.

Например: "В пояснительной записке рассматриваются конструктивные особенности шасси самолета Ту-154, анализируются действующие

шие на него нагрузки и условия работы. Представлена статистика отказов и неисправностей, выполнен качественный анализ и расчет характеристик надежности шасси. Записка содержит 30 страниц, в том числе 5 таблиц и 8 иллюстраций. Приложение к записке – чертеж шасси с указанием дефектов, гистограммы статистического и графики теоретического распределений на 1,5 листах”.

**С о д е р ж а н и е** представляет собой последовательное перечисление заголовков разделов, подразделов и пунктов основной части записки с указанием номеров страниц, на которых эти заголовки помещены. Заголовки нумеруются арабскими цифрами. Оглавление составляется на отдельном листе (листах).

Основная часть должна содержать следующие разделы:

1. Введение – 1,5–2,0 с.
2. Особенности конструкции, принцип работы, действующие нагрузки и условия эксплуатации объекта – 3 – 4 с.
3. Сведения о регламенте и технологии ТО объекта – 2 – 3 с.
4. Статистические данные об отказах и неисправностях объекта – 2 – 3 с.
5. Качественный анализ надежности объекта – 3–4 с.
6. Расчет характеристик надежности объекта – 12–15 с.
7. Выводы и рекомендации по обеспечению заданного уровня надежности объекта – 1–2 с.

При оформлении основной части записки следует руководствоваться требованиями ГОСТа [6].

**С с ы л к и .** на литературу дается с указанием порядкового номера по списку источников, выделенного двумя квадратными скобками.

**Ф о р м у л ы** должны иметь ссылку на источник, из которого они взяты, и расшифровку символов в той последовательности, в какой они приведены в формуле.

Если на формулы имеются ссылки в последующем тексте, то они должны иметь порядковые номера в пределах раздела, обозначенные арабскими цифрами в круглых скобках, например (3.2), где 3 – номер раздела, 2 – номер формулы (допускается также сквозная нумерация формул).

**Т а б л и ц ы**, как и формулы, нумеруются в пределах раздела (таблица 6.1 – таблица 6 в разделе I). На них в тексте должны быть текстовые ссылки, например: “Результаты расчета эмпирических харак-

теристик надежности приведены в табл. 6.1". Таблицы следует помещать после первого упоминания о них в тексте.

Кроме номера, таблица должна иметь тематический заголовок, например: "Расчет эмпирических характеристик надежности".

При переносе части таблицы на следующие страницы над перенесенными частями пишут - Продолжение табл. 6.1, а вместо головки таблицы (заголовков граф) приводится нумерация, которую следует указать в первой части таблицы. На последней странице таблицы следует написать - Окончание табл. 6.1.

Иллюстрации следует размещать по тексту так, чтобы ими удобно было пользоваться при чтении записки. Иллюстрированный материал должен быть органически связан с текстом, дополнять и пояснять его. Иллюстрации нумеруются арабскими цифрами в пределах раздела (рис. 2.1, 2.2 и т.д.). Ссылки на иллюстрации даются в круглых скобках - (рис. 2.1). Каждый рисунок должен иметь подрисовочную подпись. Например: Рис. 6.1. Гистограммы статистического распределения. Если иллюстрации размещаются вдоль страницы, то они должны быть расположены так, чтобы при их рассмотрении записку надо было повернуть по часовой стрелке.

Если в основной части много рисунков и таблиц, выполненных на отдельных страницах, то их можно помещать по порядку в конце записки в приложении.

Все листы записки, включая отдельные рисунки и таблицы, должны иметь сквозную нумерацию справа сверху страницы.

Приложения содержат дополнительный материал, не вошедший в основную часть записки. Раздел этот может отсутствовать.

Список используемых источников составляется в порядке упоминания литературы по тексту (иногда в алфавитном порядке) в соответствии с требованиями ГОСТ [7].

## 2.2. Содержание графической части проекта

1. Конструктивный чертеж объекта (системы, узла, агрегата) с указанием мест возникновения отказов и неисправностей и их видов - 0,5-1,0 лист.

2. Диаграммы качественного анализа статистических данных, гистограммы статистических и графики теоретических законов распределения отказов и неисправностей - 1,0-0,5 листа.

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ И СБОРУ МАТЕРИАЛА ДЛЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ В ПЕРИОД ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ

Качественное выполнение курсовой работы зависит от того, насколько всесторонне и глубоко студент изучил вопросы по теме работы и какой объем статистических данных об отказах и неисправностях объекта он собрал в период производственной практики.

Прежде всего следует детально изучить конструкцию заданных систем, узла, агрегата, принцип работы, основные характеристики, действующие нагрузки и условия работы, а также регламент и технологию технического обслуживания объекта в основном по техническим описаниям самолета, вертолета, двигателя, с помощью регламента и технологии для заданного типа авиационной техники. Лучший метод изучения указанных вопросов – работа с технической литературой и непосредственное участие студента в процессе технического обслуживания самолета (вертолета).

Статистические данные об отказах и неисправностях авиационной техники могут быть получены в группах учета неисправностей при технических отделах (ТКБ, ОТК), в бюро надежности авиационно-технических баз, в группах статистики при отделах главного технолога (ОГТ) на заводах ГА, в отделах надежности на заводах МАП в виде карточек учета неисправностей авиатехники, дефектных ведомостей, годовых и квартальных отчетов, технических отчетов по исследованию причин досрочного снятия с эксплуатации агрегатов и двигателей, технических (рекламационных) актов, бюллетеней, сводных ведомостей и др.

Полученные данные следует сгруппировать в виде таблицы ([5], приложение Г).

В первой графе указывается бортовой или заводской номер летательного аппарата, если рассматривается неисправность его систем (узлов, агрегатов), и дополнительно заводской номер двигателя, если рассматривается неисправность систем (узлов) двигателя.

Во второй графе указывается наименование и шифр узла (агрегата, детали), на котором обнаружена неисправность. Например: "Гидравлический плунжерный насос, НП-89".

В третьей графе отмечается вид или характер неисправности, отказа с учетом физической сущности явления, следствием которого яви-

лась данная неисправность. Здесь же следует указать, что произошло: отказ или дефект, а также дату их обнаружения. Например: "Разрушение вала привода насоса, отказ, 20.6.80" или "Течь АМТ-10 из штуцера нагнетания, дефект, 8.08.80".

В четвертой графе указывается налет в часах или наработка в посадках, циклах включения (выключения) и т.д. объекта на момент обнаружения отказа или неисправности после последнего ремонта (НР) и с начала эксплуатации (СНЭ).

В пятой графе отмечаются обстоятельства обнаружения неисправностей (при взлете, наборе высоты, крейсерском режиме, снижении, заходе на посадку, посадке, висении, запуске двигателей, обслуживании по форме А, Б, В, Г, 1, 2, 3 и т.д., разовом осмотре, буксировке и др.) и метод их обнаружения (визуально или с помощью неразрушающих методов контроля).

Например, отказ передней стойки шасси обнаружен при взлете по табло сигнализации положения шасси. В этой графе следует записать: "При взлете горит зеленое табло". Если при техническом обслуживании по форме 2 с помощью магнитного контроля обнаружена трещина подкоса шасси, в графе следует записать: "Ф-2, магнитный контроль".

В шестой графе указывается, то послужило причиной возникновения отказа или неисправности и как они классифицируются. Установить истинную причину появления отказов и неисправностей без специальных дополнительных исследований, как правило, очень трудно. Поэтому заключение в данном случае можно сделать только предположительно, что не исключает необходимости серьезного обоснования предположений. В установлении причин отказов и неисправностей большую помощь может оказать инженерно-технический состав, к которому следует обращаться за консультацией.

Причина отказа или неисправности может быть выражена в форме: недостаточная усталостная прочность, перезатяжка резьбового соединения, потеря физико-механических свойств, нарушение технологии технического обслуживания и т.д.

Отказы и неисправности в зависимости от причин принято классифицировать как конструктивные, технологические (производственные) и эксплуатационные.

Конструктивные неисправности обусловлены ошибками конструктора, несовершенством применяемых методов конструирования и расчета,

несоответствием выбранных материалов действующим нагрузкам и т.п.

Технологические (производственные) неисправности вызваны низким качеством изготовления материалов, деталей, нарушением технологического процесса изготовления и др.

Эксплуатационные неисправности являются следствием нарушения установленных правил эксплуатации, технического обслуживания и ремонта летательных аппаратов.

В седьмой графе отмечаются последствия выявленного отказа или неисправности в форме: летное происшествие, предпосылка к летному происшествию, вынужденная посадка, полет с выключенным двигателем, невыполнение задания, задержка рейса, простой, без последствий.

В восьмой графе указывается способ устранения неисправности: досрочный съем двигателя, регулировка, ремонт, замена агрегата, узла, модуля, детали.

В девятой графе приводятся дополнительные сведения о рассматриваемом объекте и неисправностях, а именно — о количестве ремонтов, ресурсе, наличии бюллетеней по предупреждению данной неисправности и др.

После сбора статистики отказов и неисправностей следует установить общее число летательных аппаратов, эксплуатирующихся в АТБ в период, за который был собран материал.

Следует еще раз подчеркнуть, что полнота и качество собранного для выполнения курсовой работы материала целиком зависят от того, насколько серьезно студент отнесется к этому этапу работы в период производственной практики.

#### 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

##### 4.1. Введение

Во введении следует кратко изложить цель курсовой работы, показать влияние надежности авиационной техники на безопасность полетов и эффективность использования летательных аппаратов, охарактеризовать избранный метод расчета надежности, указать область задач, решение которых возможно с помощью собранных статистических данных об отказах и неисправностях авиационной техники.

Здесь же приводится характеристика предприятия по месту прохождения производственной практики с точки зрения организации работы по сбору информации, анализу, расчету и обеспечению надежности авиационной техники.

#### 4.2. Особенности конструкции, принцип работы и условия эксплуатации объекта

В этом разделе следует кратко описать конструкцию, принцип работы, основные характеристики заданной системы (узла, агрегата), подчеркнув особенности и отличия их от других однотипных изделий.

Далее нужно проанализировать действующие нагрузки и условия работы объекта.

#### 4.3. Сведения о регламенте и технологии технического обслуживания объекта

В этом разделе следует кратко охарактеризовать метод технического обслуживания объекта, показать его преимущества и недостатки, принцип построения регламента и технологии ТО, основные работы, выполняемые при техническом обслуживании.

#### 4.4. Качественный анализ надежности объекта

В этом разделе в табличной форме ([5], приложение I) представляется весь материал по отказам и неисправностям авиационной техники, собранный в период прохождения производственной практики, и приводится анализ табличных данных о неисправностях и отказах. При этом рассматриваются такие вопросы, как частота отказов и неисправностей данного вида, неисправности и отказы, представляющие наибольшую опасность в отношении снижения безопасности полетов, частота отказов и неисправностей агрегатов (узлов) определенного типа, более подробно анализируются причины отказов и неисправностей. Если по результатам анализа можно выдать конкретные рекомендации по обеспечению требуемой надежности объекта, то такие рекомендации следует дать.

Количественные соотношения (в %) по классификации причин отказов и неисправностей, по типу агрегатов, по виду неисправностей и отказов и других следует представить в виде круговых или прямоугольных диаграмм.

Узел (агрегат), имеющий наибольшее число неисправностей определенного вида, выбирается для дальнейшего расчета характеристик его надежности.

### Расчет характеристик надежности объекта

Собранный на производственной практике статистический материал позволяет рассчитать эмпирические характеристики надежности объекта, а затем установить теоретические функции распределения отказов. Здесь и далее имеются в виду также неисправности, дефекты.

Знание функций распределения позволяет осуществить контроль уровня надежности в период эксплуатации объекта, уточнить возможность дальнейшего увеличения ресурса, рассчитать и откорректировать сроки профилактических работ, определить необходимость проведения работ по совершенствованию объекта с целью повышения уровня его надежности, решить другие задачи.

С позиции теории надежности одним из важнейших этапов организации работ по сбору информации о надежности АТ является планирование наблюдений. При этом различают следующие планы наблюдений [8]:

$[N, U, M]; [N, U, T]; [N, U, T^*]; [N, R, T]; [N, R, T^*],$

где  $N$  — общее число изделий, поставленных под наблюдение;

$U$  — планы для неремонтируемых изделий (отказавшие изделия АТ в дальнейшем могут быть отремонтированы, но их отказы после ремонта из рассмотрения исключаются);

$T$  — установленное время наблюдения;

$R$  — планы для ремонтируемых изделий (результаты наблюдения за отремонтированными изделиями включаются в общие вплоть до снятия изделия с эксплуатации);

$T^*$  — число отказов (пределных состояний), до возникновения которых проводится наблюдение.

Указанные планы трактуются следующим образом:

[ $N, U, N$ ]

- под наблюдение поставлено  $N$  изделий АТ, наблюдение ведется до отказа (наступление предельного состояния) всех изделий, отказавшее изделие новым не заменяется (случай полной выборки). В практике эксплуатации АТ встречается редко. Требуется длительного времени наблюдения.

[ $N, U, T$ ]

- под наблюдение поставлено  $N$  изделий, наблюдение ведется до наступления момента  $T$ , отказавшее изделие новым не заменяется (усеченная выборка).

[ $N, U, r$ ]

- под наблюдение поставлено  $N$  изделий, наблюдение ведется до появления  $r$  отказов, отказавшие изделия новыми не заменяются (усеченная выборка).

[ $N, A, T$ ]

- под наблюдение поставлено  $N$  изделий, наблюдение ведется до наступления момента  $T$ , отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются (усеченная выборка).

[ $N, R, r$ ]

- под наблюдение поставлено  $N$  изделий, наблюдение ведется до наступления  $r$  отказов, отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются (усеченная выборка).

Последние четыре плана осуществляются на основе усеченных выборок и легко воспроизводимы в условиях как обычной эксплуатации, так и при различных видах испытаний авиационной техники.

Суть усеченной выборки, например для плана [ $N, U, T$ ] состоит в следующем:  $N$  объектов наблюдается в течение времени  $t_a$ . При этом, если отказ появляется при наработке меньшей  $t_a$ , то фиксируется эта наработка  $t_i$ . Если отказ не появился за время  $t_a$ , то наблюдение прекращается.

Эта ситуация близка к реальной. Действительно, допустим, что речь идет о воздушном винте, имеющем ресурс  $T_p$ . Если отказ обнаружен до отработки ресурса, то фиксируется наработка  $t_i$ ; если отказ не обнаруживается, то винт снимается с эксплуатации по отработке ресурса.

Вид плана наблюдения определяет в дальнейшем зависимость, по которой будут рассчитаны теоретические параметры распределений.

Независимо от плана наблюдения последовательность обработки статистических данных при определении функций распределения следующая.

### Первичная обработка статистических данных об отказах объекта

Из общей статистики выбирается наработка до появления отказа данного вида для объекта, расчет параметров надежности которого производится. Эта наработка располагается в ряд в порядке возрастания ее значений (строится вариационный ряд):  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, \dots$

Устанавливается общее число объектов  $N$  (по месту практики), находящихся на эксплуатации, время наблюдения  $t_a$  или число отказов  $r$  (в зависимости от плана наблюдения), до появления которых производилось наблюдение.

Далее производится группировка выборки по временным интервалам, для чего вариационный ряд разбивается на  $K$  интервалов:

$$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_n.$$

Группировку можно производить двояким способом, устанавливая либо величину интервала, либо их число.

В первом случае величина интервала  $\Delta t_i$  выбирается таким образом, чтобы в каждый интервал попадало порядка 3-5 отказов.

Во втором случае можно использовать правило Старджена, согласно которому  $K = 1 + 3,3 \lg n$ , где  $n$  - общее число отказавших объектов.

Желательно (для удобства расчетов) величины интервалов принимать равными между собой, хотя это и не обязательно.

### Расчет эмпирических характеристик надежности объекта

Устанавливается номенклатура эмпирических характеристик в зависимости от плана наблюдений и производится их расчет по нижеприведенным формулам для каждого интервала  $\Delta t_i$ .

Плотность распределения вероятностей

$$f^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N \Delta t_i},$$

где  $\Delta n_i$  - число отказов на интервале  $\Delta t_i$ .

Интенсивность отказов

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta n_i}{(N - n_{i-1}) \Delta t_i},$$

где  $(n_{i-1})$  - суммарное число отказов по интервалам, предшествующим рассматриваемому.

Для восстанавливаемых объектов определяется параметр потока отказов

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N \Delta t_i},$$

где  $\Delta n_i$  включает в себя повторяющиеся отказы одних и тех же объектов.

Вероятность безотказной работы

$$P^*(t) = f^*(t) / \lambda^*(t).$$

Результаты расчета удобно представить в табличной форме (табл. 4.1).

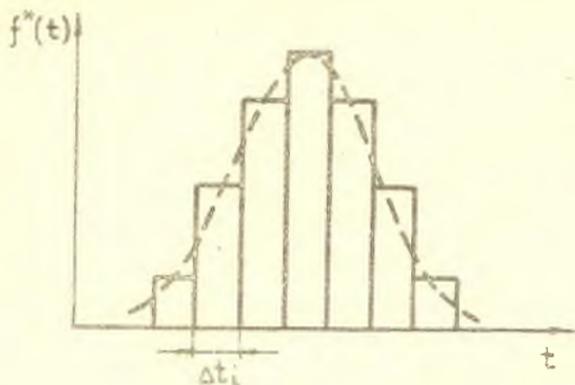
Т а б л и ц а 4.1

Расчет эмпирических характеристик надежности

Номер интервала	$t_i, t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$\Delta n_i$	$f^*(t)$	$\lambda^*(t)$	$P^*(t)$
1	$t_1, t_2$	$\Delta t_1$	$\Delta n_1$	$f_1^*$	$\lambda_1^*$	$P_1^*$
2	$t_2, t_3$	$\Delta t_2$	$\Delta n_2$	$f_2^*$	$\lambda_2^*$	$P_2^*$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
i	$t_i, t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$\Delta n_i$	$f_i^*$	$\lambda_i^*$	$P_i^*$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
k	$t_k, t_{k+1}$	$\Delta t_k$	$\Delta n_k$	$f_k^*$	$\lambda_k^*$	$P_k^*$

#### Построение гистограммы

По данным табл. 4.1 строятся гистограммы - геометрическая интерпретация таблицы (рис. 4.1). На оси абсцисс откладываются интервалы  $\Delta t_i$ , которые будут служить основаниями прямоугольников. Высота каждого прямоугольника (ордината) равна соответственно  $f_i^*(t)$ ;  $\lambda_i^*(t)$ ;  $P_i^*(t)$ .



Р и с. 4.1. Гистограмма и ее огибающая.

Если объем выборки  $N$  неограниченно возрастает, а длина интервала  $\Delta t_i$  стремится к нулю, то ступенчатая гистограмма постепенно переходит в некоторую непрерывную функцию, например, в плотность распределения вероятностей (рис. 4.1).

На основе анализа вида гистограмм, путем сравнения их с известными функциями распределения ([5], приложение 2) и с учетом физической сущности рассматриваемого отказа, структуры объекта, условий эксплуатации подбирается теоретический закон распределения отказов [1, 2].

Так, отличительной особенностью экспоненциального распределения является то, что интенсивность отказов здесь не зависит от наработки. Такое распределение характерно для внезапных отказов, которые появляются без каких-либо предшествующих симптомов.

Физическая сущность таких отказов заключается во внезапной случайной концентрации нагрузок, действующих внутри и вне объекта. При этом отказ наступает только тогда, когда нагрузка превысит допустимую величину. Ясно, что наработка объекта в этом случае не будет сказываться на интенсивности отказов.

Экспоненциальное распределение имеет место также в случае, когда объект состоит из большого числа элементов и вероятности отказа каждого из них малы. Обычно эти отказы радиоэлектронного и висотного самолетного оборудования, течь рабочей жидкости через уплотнения и др.

Нормальное распределение имеет место когда суммируется достаточно большое число независимых или слабозависимых случайных величин. При этом накладывается ограничение, состоящее в том, что все величины в общей сумме должны играть относительно малую роль. В противном случае резко преобладающая в этой сумме величина и определяет закон ее распределения.

При неограниченном росте числа испытаний другие распределения приближаются к нормальному.

В практике эксплуатации авиационной техники нормальное распределение характерно для износных отказов с постоянной скоростью износа, под которым понимается собственно износ, старение, накопление повреждений и другие процессы с постоянной скоростью развития.

Примером может служить износ протекторов авиашин, живучесть усталостных трещин лопаток турбин и др.

Физической моделью логарифмически нормального распределения может быть следующая ситуация. Каждое воздействие внешней нагрузки приводит к накоплению повреждений в материале объекта. При этом величина добавляемого повреждения пропорциональна накопленному. Отказ наступает тогда, когда накопленное повреждение превысит определенную величину. Примером может служить усталостная долговечность многих деталей авиационной техники (лопатки, шкивы, валы и другие детали авиадвигателей, силовой набор, узлы крепления агрегатов и другие детали летательных аппаратов).

Распределению Вейбулла обычно отвечает физическая модель так называемого "слабого звена". Объект представляется состоящим из большого числа элементов, подверженных поломкам. Накопление повреждений в элементах идет независимо друг от друга. Отказ объекта наступает при отказе первого элемента. При этом независимо от типа распределения отказов каждого элемента распределение отказов объекта будет Вейбулловским.

Распределение Вейбулла, как и логарифмически нормальное распределение, хорошо описывает усталостную долговечность авиационных конструкций, а также приработочные отказы.

Для объектов, имеющих интенсивные износы, накопления повреждений, старение, характерно распределение Рэлея.

Равномерное распределение может быть использовано в случаях, когда отсутствуют физические предположения, приводящие к вышеописанным моделям, а гистограмма плотнос-

ти не имеет явно выраженной тенденции к уменьшению или увеличению.

Рассмотренные функции распределения (математические модели отказов) не являются исчерпывающими. При обработке статистических данных могут быть получены и другие типы распределений.

В некоторых случаях гистограммы могут указывать на сочетание двух и более распределений, что свидетельствует о различных физических причинах отказов на различных этапах эксплуатации. Например, экспоненциальное распределение переходит в нормальное. В этом случае на основе ранее выполненного качественного анализа надежности, действующих нагрузок и условий работы следует обосновать такой вид гистограммы. Дальнейший расчет для соответствующих распределений ведется раздельно.

### Определение значений параметров распределения

Число неизвестных параметров зависит от типа распределения ([5], приложение 3). Расчет значений параметров сводится к составлению и решению уравнений. Число уравнений равно числу неизвестных параметров. Следует подчеркнуть: поскольку определение неизвестных параметров распределений базируется на опытных (эксплуатация ЛА с позиций теории надежности есть также опыт) данных, речь может идти только об оценках этих параметров, а не об истинных их значениях.

Существует несколько методов составления уравнений. Для усеченной выборки следует использовать метод максимума правдоподобия или метод разделяющих разбиений (отдавая предпочтение первому).

Метод максимума правдоподобия [3] основан на идее определения вероятности наблюдаемых событий и нахождения таких значений параметров, которые обращают эту вероятность в максимум.

Для усеченной выборки из всей совокупности объектов  $N$  имеем реализацию случайной величины  $t_i : t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n < t_a$ , где  $t_a$  — время наблюдений.

Поскольку время есть непрерывная случайная величина, вероятность попадания в точку  $P(t=t_i)=0$ . Поэтому следует рассматривать вероятность попадания случайной величины  $t_i$  в некоторый интервал времени  $t_i \pm \frac{\Delta t_i}{2}$ .

Вероятность попадания в этот интервал

$$P\left\{t_i - \frac{\Delta t_i}{2} \leq \Delta t_i \leq t_i + \frac{\Delta t_i}{2}\right\} = f(t_i) \Delta t_i.$$

Вероятность же получения совокупности значений  $t_i$

$$P_1 = f(t_1) f(t_2) \dots f(t_i) \dots f(t_n) \Delta t_1 \Delta t_2 \dots \Delta t_i \dots \Delta t_n.$$

При равных интервалах  $P_1 = f(t_1) f(t_2) \dots f(t_i) \dots f(t_n) \Delta t^n = \Delta t^n \prod_{i=1}^n f(t_i)$ .

Вероятность превышения наработки до отказа времени наблюдения

$t_j > t_a$ , где  $j \in [n+1, n+2, \dots, N]$ , будет  $P(t_j > t_a) = 1 - F(t_a)$ , где

$F(t)$  — функция распределения случайной величины  $T$ .

Для совокупности значений  $P_2 = [1 - F(t_a)]^{N-n}$ .

Полное уравнение вероятности получения всей совокупности значений величины  $t$  имеет вид:  $P = P_1 P_2 = \Delta t^n \prod_{i=1}^n f(t_i) [1 - F(t_a)]^{N-n}$ .

Эта вероятность должна быть максимальной.

Действительно, данная совокупность значений случайной величины  $t$  уже реализована, поскольку статистика отказов получена по данным реальной эксплуатации объекта.

Максимальной должна быть и величина  $\frac{P}{\Delta t^n} = \prod_{i=1}^n f(t_i) \times [1 - F(t_a)]^{N-n}$ .

Для удобства расчетов берется логарифм этого выражения:

$$L = \ln \frac{P}{\Delta t^n} = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i) + (N-n) \ln [1 - F(t_a)]. \quad (4.1)$$

Функцию  $L$  и называют функцией правдоподобия.

Для определения неизвестных параметров  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  распределения, соответствующих максимальной вероятности, следует взять частные производные от функции  $L$  по этим параметрам, приравнять их к нулю и решить систему уравнений (исследование функции на экстремумы):

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_1} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \alpha_2} = 0, \dots, \quad \frac{\partial L}{\partial \alpha_m} = 0.$$

Так, для экспоненциального распределения случайной величины имеем  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ ,  $1 - F(t_a) = 1 - P(t_a) = e^{-\lambda t_a}$ .

Производная по неизвестному параметру  $\lambda$  от функции правдоподобия будет иметь вид

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial \lambda} = \ln(\lambda e^{-\lambda t_i}) + (N-n) \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln e^{-\lambda t_a} = 0.$$

Решая это уравнение, получим  $\frac{\partial}{\partial \lambda} \ln(\lambda e^{-\lambda t}) = \frac{1}{\lambda} - t;$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \ln e^{-\lambda t_a} = -t_a.$$

Отсюда 
$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n t_i - (N-n)t_a = 0$$

$$\lambda = \frac{1}{\lambda} = \tau_{cp} = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n t_i + (N-n)t_a \right]. \quad (4.2)$$

Для нормального распределения по усеченным данным без вывода уравнения имеют вид:

$$(N-n) \frac{\varphi' \left( \frac{t_a - m_t}{\sigma_t} \right)}{1 - \varphi \left( \frac{t_a - m_t}{\sigma_t} \right)} + \frac{1}{\sigma_t^2} \sum_{i=1}^n t_i - \frac{n}{\sigma_t^2} m_t = 0;$$

$$(N-n) \frac{\varphi' \left( \frac{t_a - m_t}{\sigma_t} \right)}{1 - \varphi \left( \frac{t_a - m_t}{\sigma_t} \right)} t_a - n + \frac{1}{\sigma_t^2} \sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{m_t}{\sigma_t^2} \sum_{i=1}^n t_i = 0. \quad (4.3)$$

где  $\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{u^2}{2}} du$  — стандартная нормальная функция распределения;  $\varphi' \left( \frac{t_a - m_t}{\sigma_t} \right) = f(t_a).$

Уравнения (4.3) могут быть решены только численным методом с использованием ЭВМ.

Для распределения Вейбулла можно получить уравнения, выраженные в явном виде:

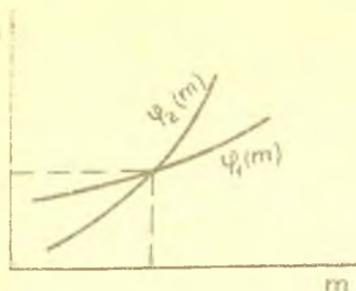
$$t_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i + \frac{N-n}{n} t_a;$$

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^m \ln t_i + (N-n)t_a^m \ln t_a}{\frac{n}{m} + \sum_{i=1}^n \ln t_i}, \quad (4.4)$$

где  $t_0$  и  $m$  - неизвестные параметры.

Эту систему можно решать графически или с помощью ЭЕМ.

Графический метод предусматривает построение кривых  $t_0 = \varphi_1(m)$  и  $t_0 = \varphi_2(m)$  по ряду значений  $m$ . Точка пересечения этих кривых даст значения искомых параметров  $t_0$  и  $m$  (рис. 4.2).



Р и с. 4.2. Графическое решение уравнений

Метод разделяющих разбиений [1] заключается в приравнивании эмпирических значений функции распределения  $F^*(t)$  при некоторых выбранных значениях  $t_i$  к значениям теоретической функции распределения  $F(t)$ . При этом составляется и решается система уравнений по числу неизвестных параметров.

Так, для двух неизвестных параметров система имеет вид

$$F^*(t_1) = F(\alpha_1, \alpha_2, t_1); \quad F^*(t_2) = F(\alpha_1, \alpha_2, t_2).$$

В данном случае значения  $t_1$  и  $t_2$  следует выбирать в первой и последней третях значений  $t_i$ .

Для нормального распределения неизвестные параметры определяются из уравнений:

$$F^*(t_1) = \Phi\left(\frac{t_1 - m}{\sigma}\right); \quad F^*(t_2) = \Phi\left(\frac{t_2 - m}{\sigma}\right).$$

По эмпирическим значениям функций  $F^*(t_1)$  и  $F^*(t_2)$  из таблицы значений  $\Phi(Z)$  ([5], приложение 4) определяем аргументы  $Z_1$  и  $Z_2$ . Тогда

$$Z_1 = \frac{t_1 - m_t}{\sigma_t}; \quad Z_2 = \frac{t_2 - m_t}{\sigma_t}.$$

При решении уравнений получим

$$m_t = \frac{t_1 Z_2 - t_2 Z_1}{Z_2 - Z_1}; \quad \sigma_t = \frac{t_2 - t_1}{Z_2 - Z_1}. \quad (4.5)$$

Случай логарифмически нормального распределения сводится к предыдущему, так как нормальное распределение здесь имеют логарифмы случайных величин. Параметры логарифмического распределения вычисляются по формулам

$$m_l = \frac{\ln t_1 Z_2 - \ln t_2 Z_1}{Z_2 - Z_1}; \quad \sigma_l = \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{Z_2 - Z_1}, \quad (4.6)$$

где  $m_l$  и  $\sigma_l$  - параметры логарифмически нормального распределения.

Тогда  $m_t = \exp[m_l + 0,5\sigma_l^2]$ ;

$$\sigma_t^2 = [\exp(\sigma_l^2) - 1] \exp(2m_l + \sigma_l^2) = [\exp(\sigma_l^2) - 1] m_t^2.$$

Значение параметров распределения дает возможность построить графики функций распределения  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $P(t)$ . В приложении 5 [5] приведены формулы, составленные на основе метода максимума правдоподобия для определения параметров при различных планах наблюдений. Однако прежде чем строить эти графики, следует убедиться в правильности подобранного распределения.

#### Проверка правильности принятой гипотезы о виде распределения

Такая проверка делается с помощью критерия Колмогорова или "критерия  $\chi^2$ " Пирсона.

Критерий Колмогорова применяется только в случае, когда вид распределения и его параметры известны заранее, до опыта. При оп-

ределении вида распределения и значений его параметров по статистическим данным для проверки правильности принятой гипотезы следует использовать "критерий  $\chi^2$ ".

Суть любого метода оценки расхождения теоретического и статистического распределений состоит в установлении некоторой величины  $U$ , характеризующей степень расхождения. Это может быть сумма квадратов отклонений теоретических вероятностей  $P_i$  от соответствующих эмпирических  $P_i^*$ , максимальное отклонение статистической функции распределения  $P^*(t)$  от теоретической  $P(t)$  и т.д. [2, 4].

Очевидно, в любом случае величина  $U$  есть случайная величина. Закон ее распределения зависит от закона распределения случайной величины  $T$ , которая исследовалась (наработка объекта до отказа), и числа испытаний  $n$ . Если гипотеза верна, то закон распределения величины  $U$  определяется законом распределения величины  $T$  [функций  $P(t)$ ] и числом  $n$ .

Допустим, величина  $U$  приняла некоторое значение  $u$ . Тогда, если вероятность события  $U > u$  весьма мала, то принятую гипотезу следует отвергнуть как маловероятную, т.е. в данном случае расхождение между теоретическим и статистическим распределениями нельзя объяснить только случайными причинами, связанными с недостаточным объемом опытного материала.

Если же вероятность события  $U > u$  значительна, следует признать, что экспериментальные данные не противоречат гипотезе о подобранном распределении.

Какую же величину следует выбрать за меру расхождения? Оказывается, что при некоторых способах ее выбора закон распределения величины  $U$  практически не зависит от функции  $P(t)$  (при достаточно больших  $n$ ). Именно такими свойствами обладает "критерий  $\chi^2$ ".

Допустим, что проводятся испытания  $N$  однотипных объектов, из которых  $n$  отказали, т.е. за период испытаний  $t_a$  случайная величина  $T$  приняла ряд значений  $t_i$ .

Результаты испытаний сведены в  $k$  разрядов (интервалов  $\Delta t_i$ ) и оформлены в виде статистического ряда (табл. 4.2).

В таблице  $q_i$  есть вероятность отказа на интервале  $\Delta t_i$ .

Требуется проверить, согласуются ли эти экспериментальные данные с гипотезой о том, что случайная величина  $T$  имеет данный

## Статистический ряд

Разряды	$t_1; t_2$	$t_2; t_3$	...	$t_k; t_{k+1}$
Вероятности	$q_1^*$	$q_2^*$	...	$q_k^*$

закон распределения  $F(t)$ . Поскольку теоретический закон  $F(t)$  в данном случае считается известным, можно найти теоретические вероятности  $q$  попадания случайной величины в каждый из разрядов (вероятности отказов объекта на каждом интервале):  $q_1, q_2, \dots, q_k$ .

В качестве меры расхождения следует выбрать сумму квадратов отклонений  $q_i^* - q_i$ , взятых с некоторыми "весами"  $c_i$ :

$$U = \sum_{i=1}^k c_i (q_i^* - q_i)^2.$$

"Вес" разрядов вводится вследствие того, что отклонения  $(q_i^* - q_i)$  в различных разрядах нельзя считать равноценными по значимости, так как одно и то же абсолютное отклонение может быть мало-значимым при больших  $q$  и существенным при малых  $q$ . Поэтому "веса" берутся обратно пропорциональными вероятностям разрядов  $q_i^*$ .

К. Пирсон показал, что если "веса" представить в виде  $c_i = \frac{N}{q_i^*}$ , то при больших  $N$  закон распределения величины  $U$  практически не зависит от функции  $F(t)$  и числа опытов  $N$ , а зависит только от числа разрядов  $k$ . Этот закон при увеличении  $N$  приближается к так называемому "распределению  $\chi^2$ ".

При таком выборе коэффициентов  $c_i$  мера расхождения обычно обозначается  $\chi^2$ :

$$U = \chi^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(q_i^* - q_i)^2}{q_i^*}.$$

Для удобства вычислений (чтобы исключить дробные величины с большим числом нулей)  $N$  вводится под знак суммы. С учетом того, что  $q_i^* = \frac{\Delta n_i}{N}$ , эта формула приобретает следующий вид:

$$U = \chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_i - N q_i)^2}{N q_i} \quad (4.7)$$

Распределение  $\chi^2$  зависит от параметра  $r$  - числа "степеней свободы" распределения, которое равно числу разрядов  $k$  минус число независимых условий (связей), наложенных на  $q_i^*$ .

Число связей равно числу неизвестных параметров распределения плюс единица (для всех случаев накладывается требование  $\sum_{i=1}^k q_i^* = 1$ ).

Для распределения  $\chi^2$  составлены таблицы ([5], приложение 6). По ним для каждого значения  $\chi^2$  и числа степеней свободы  $r$  можно найти вероятность того, что величина, распределенная по закону  $\chi^2$ , превзойдет табличное значение. Если эта вероятность мала (0,1 и менее), то гипотезу следует отвергнуть.

Оценку согласованности распределений можно производить и другим способом, задаваясь уровнем значимости -  $\alpha$ . Уровень значимости в данном случае - это выраженная в процентах максимально допустимая вероятность того, что гипотеза отвергнута неправильно. Наиболее употребительны уровни значимости - 1, 5, 10%.

По табличным данным, задаваясь уровнем значимости для данного числа степеней свободы, определяется критическая область ( $\chi_{1-\alpha}^2 + \infty$ ). Если подсчитанное по формуле (4.7) значение критерия попадает в критическую область, гипотеза отвергается.

Все расчеты по оценке согласованности теоретического и статистического распределений оформляются в виде таблицы (табл. 4.3)

Следует обратить внимание на то, что для усеченных данных добавляется еще один разряд (интервал)  $\Delta t_{g+1} \gg \Delta t_g$ , т.е. число разрядов увеличивается на единицу.

Все расчеты, связанные с определением характеристики надежности, следует проводить с использованием ЭВМ, для чего на кафедре ЭМЛД имеются соответствующие методическое указание и программы расчета.

### Построение графиков теоретического распределения

Убедившись, что закон подобран верно, строятся графики распределений  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  и  $P(t)$ . Для получения полного представления о проведении характеристик надежности объекта диапазон изменения величины  $t$  следует увеличить.

Оценка сходимости теоретического и статистического распределений

$t_i$	$t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$\Delta n_i$	$q_i(t) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t) d(t)$	$Nq_i$	$\Delta n_i - Nq_i$	$U_i^2 = \frac{(\Delta n_i - Nq_i)^2}{Nq_i}$
$t_1$	$t_2$	$\Delta t_1$	$\Delta n_1$	$q_1$	$Nq_1$	$n_1 - Nq_1$	$U_1^2$
$t_2$	$t_3$	$\Delta t_2$	$\Delta n_2$	$q_2$	$Nq_2$	$\Delta n_2 - Nq_2$	$U_2^2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$t_k$	$t_{k+1} = t_n$	$\Delta t_k$	$\Delta n_k$	$q_k$	$Nq_k$	$\Delta n_k - Nq_k$	$U_k^2$
$t_{k+1}$	$t_{k+2}$	$\Delta t_{k+1} (> \Delta t_k)$	$\Delta n_{k+1} = N - n$	$1 - \sum_{i=1}^k q_i$	$N(1 - \sum_{i=1}^k q_i)$	$N - n - N(1 - \sum_{i=1}^k q_i)$	$U_{k+1}^2$
							$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k+1} U_i^2$

## Определение точности оценок параметров распределения

Точность оценок параметров распределения определяется по заданию консультанта. В общем случае требуется установить, к каким ошибкам может привести замена параметра  $m$  его оценкой  $m^*$  или с какой степенью уверенности можно ожидать, что эти ошибки не выйдут за известные пределы. Это особенно важно для малых выборок, какими обычно являются статистические данные, полученные в период прохождения производственной практики.

Для этого в математической статистике используются доверительные вероятности и доверительные интервалы.

Пусть для параметра  $m$  получена несмещенная оценка  $m^*$ . Оценим возможную при этом ошибку. Назначим некоторую достаточно большую вероятность  $\beta$  ( $\beta = 0,9; 0,95; 0,99; 0,999$  и т.д.) и найдем такое значение  $\varepsilon$ , для которого

$$P(m^* - m < \varepsilon) = \beta. \quad (4.8)$$

Тогда диапазон практически возможных ошибок при использовании  $m^*$  вместо  $m$  будет равен  $\pm \varepsilon$ . Ошибки больше этого значения возможны с малой вероятностью  $\alpha = 1 - \beta$ .

Равенство (4.8) можно представить в виде

$$P(m^* - \varepsilon < m < m^* + \varepsilon) = \beta. \quad (4.9)$$

Это равенство означает, что с вероятностью  $\beta$  интервал  $I_\beta = (m^* - \varepsilon; m^* + \varepsilon)$  накрывает истинное значение  $m$ . Вероятность  $\beta$  называется доверительной вероятностью, а интервал  $I_\beta$  — доверительным интервалом. При этом  $m_1 = m^* - \varepsilon$  является нижней границей интервала, а  $m_2 = m^* + \varepsilon$  — верхней границей;  $2\varepsilon$  — точность оценки параметра.

Идея точных методов построения доверительных интервалов сводится к следующему. Любой доверительный интервал находится из условия, выражающего вероятность выполнения неравенств, в которые входит оценка  $m^*$ . В общем случае закон распределения  $m^*$  зависит от самих неизвестных параметров (в том числе и  $m$ ) закона распределения случайной величины  $T$ . Однако в неравенствах иногда удается перейти от случайной величины  $m^*$  к какой-либо другой

функции наблюдаемых значений  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , закон распределения которой не зависит от неизвестных параметров, а зависит только от числа опытов  $N$  и от вида закона распределения величины  $T$ .

Особенно хорошо эти величины изучены для случая нормального распределения [4]. Например, доказано, что при нормальном распре-

делении величины  $X$  случайная величина  $T = \sqrt{N} \frac{m^* - m}{\sqrt{D^*}}$ ,

где  $m^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ;  $D^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m^*)^2$ , подчиняется закону распределе-

ния Стьюдента с  $(N-1)$  степенями свободы и показано, что при нормальном распределении величина  $\varepsilon$  для математического ожидания с заданной доверительной вероятностью  $\beta$  равна  $\varepsilon_\beta = t_\beta \sqrt{\frac{D^*}{N}}$ ,

где  $t_\beta$  — коэффициент Стьюдента, определяемый из таблицы распределения Стьюдента ([5], приложение 7) по доверительной вероятности и числу степеней свободы.

Доверительный интервал для математического ожидания будет иметь вид

$$I_\beta(m^* - t_\beta \sqrt{\frac{D^*}{N}}; m^* + t_\beta \sqrt{\frac{D^*}{N}}).$$

Доказано также, что случайная величина  $V = \frac{(N-1)D^*}{D}$  имеет распределение  $\chi^2$  с  $(N-1)$  степенями свободы [7]. Это распределение несимметрично, поэтому доверительный интервал выбирается из соображений, что вероятности выхода величины  $V$  за его пределы влево и вправо одинаковы и равны  $\frac{\alpha}{2} = \frac{1-\beta}{2}$ . Для нижней границы эта вероятность равна  $p_1 = \frac{\alpha}{2}$ , для верхней  $p_2 = 1 - \frac{\alpha}{2}$ .

Величины  $\chi_1^2$  и  $\chi_2^2$  определяются из таблицы распределения  $\chi^2$  по вероятностям (уровням значимости)  $p_1, p_2$  и числу степеней свободы [1]. Доверительный интервал для дисперсии будет иметь вид

$$I_\beta\left(\frac{D^*(N-1)}{\chi_1^2}; \frac{D^*(N-1)}{\chi_2^2}\right).$$

Подобные величины изучены также для некоторых других видов распределения ([5], приложение 7).

#### 4.5. Выводы и рекомендации по обеспечению заданного уровня надежности объекта

В этом разделе на основании анализа изменения характеристик  $f(t), A(t), P(t)$  студент должен сделать вывод об уровне надежности объекта и дать практические рекомендации по его обеспечению или повышению.

Рекомендации могут носить как организационный, так и технический характер. Это может быть изменение конструкции объекта, применение новых материалов, ограничения по эксплуатации, корректировка периодичности регламента, ресурса и др. В частности, корректировка межремонтного ресурса  $T_q$  может быть осуществлена по заданной вероятности отказа  $q$ . Обычные уровни вероятности отказа  $q$  лежат в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-3}$ . Межремонтный ресурс устанавливается на основе решения уравнения  $P(t < T_q) = P(T_q) = q$ .

Например, если величина  $t$  имеет нормальное распределение, то имеем уравнение  $\Phi\left(\frac{T_q - m_t}{\sigma_t}\right) = q$ . Отсюда  $T_q = m_t + \sigma_t \psi(q)$ , где  $\psi(q)$  — функция, обратная функции  $\Phi(z)$ .

#### Библиографический список

1. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов / Н.Н.Смирнов, А.М.Андрионов, Н.И.Владимиров, Ю.И.Лемин. М.: Транспорт, 1974. 304 с.

2. Косточкин В.В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок: Учебн. пособие. М.: Машиностроение, 1976, 248 с.

3. Кордонский И.Х.Б., Мартынов Ю.А., Корсаков Б.Е. Основы статистического анализа данных о неисправностях и отказах авиационной техники: Учебн. пособие. Рига: РКЛИГА, 1974. 135 с.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебн. пособие. 4-е изд., стереотип. М.: Наука, 1969. 576 с.

5. Милов Е.А. Примеры расчета характеристик надежности авиационной техники: Метод. указания. Куйбышев, Куйб. 1987.

6. ГОСТ 7.32-81. Отчет о научно-исследовательской работе: Общие требования и правила оформления. Взамен ГОСТ 19600-74; Введ. 01.01.81. М.: Изд-во стандартов, 1981. 13 с. УДК 001.891(047):006.354 Группа Т62 СССР.

7. ГОСТ 7.1-84. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления. Взамен ГОСТ 7.1-76; Введ. 01.01.86. М.: Изд-во стандартов. 1984. 75 с. УДК 016:006.354. Группа Т62 СССР.

8. ГОСТ 17510-72. Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. М.: Изд-во стандартов. 1972. 19 с.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

I. Цель и задачи курсовой работы .....	3
2. Содержание и объем курсовой работы .....	3
2.1. Требования к оформлению пояснительной записки .....	4
2.2. Содержание графической части проекта ..	6
3. Методические указания по изучению и сбору материала для курсовой работы в период производственной практики .....	7
4. Методические указания по выполнению разделов курсовой работы .....	9
4.1. Введение .....	9
4.2. Особенности конструкции, принцип работы и условия эксплуатации объекта..	10
4.3. Сведения о регламенте и технологии технического обслуживания объекта .....	10
4.4. Качественный анализ надежности объекта..	10
4.5. Выводы и рекомендации по обеспечению заданного уровня надежности объекта ....	28
Библиографический список .....	28