

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Цель проведения практических занятий

- 1) ознакомление с системой стандартов «Надежность в технике»;
- 2) изучение основных понятий, терминов и определений в области надежности авиационной техники;
- 3) практическое освоение параметрических и непараметрических методов оценки показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и готовности невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий по данным испытаний и эксплуатационных наблюдений;
- 4) практическое освоение методов структурных схем и логических схем анализа безотказности функциональных систем;
- 5) приобретение практических навыков по выбору методов решения задач оценки и анализа показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и готовности невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий по данным испытаний и эксплуатационных наблюдений.

Практические занятия включают решение задач по всем основным темам дисциплины: основные термины и определения надежности, модели надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, непараметрические и параметрические методы оценки показателей надёжности, оценка показателей надёжности по данным эксплуатационных наблюдений, методы анализа функциональных систем.

1.2. Объекты практических занятий

- 1) система стандартов «Надежность в технике»;
- 2) основные понятия, термины и определения в области надежности авиационной техники;
- 3) изделия и функциональные системы ЛА;
- 4) статистические данные испытаний и эксплуатационных наблюдений по надежности изделий авиационной техники.

1.3. Методические указания по проведению каждого практического занятия содержит: название темы и цель занятия; краткие теоретические сведения по теме; вопросы, рекомендуемые к рассмотрению по теме занятий; рекомендации для выполнения данной темы занятия и собственного задания для самостоятельной работы. По каждому занятию предусмотрено несколько вариантов исходных данных. Кроме того, преподаватель может выдать студентам дополнительные варианты.

По результатам выполнения каждого практического занятия студентом составляется отчет. Отчет должен содержать название темы и цель занятия, исходные данные выполненного варианта, необходимые расчетные зависимости, примеры расчетов и результаты расчета в виде таблиц и графиков, выводы, фамилию И.О. и подпись студента, дату выполнения задания практического занятия. При представлении результатов расчетов в виде таблиц или графиков да-

ются примеры расчетов с подстановкой исходных данных в расчетные формулы.

1.4. Содержание практических занятий:

Практическое занятие № 1.

Тема: Система стандартов «Надежность в технике». Основные термины и определения.

Практическое занятие № 2.

Тема: Модели безотказности невосстанавливаемых изделий.

Практическое занятие № 3.

Тема: Модели безотказности восстанавливаемых изделий.

Практическое занятие № 4.

Тема: Непараметрические методы оценки показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и готовности изделий.

Практическое занятие № 5.

Тема: Параметрические методы оценки показателей безотказности изделий.

Практическое занятие № 6.

Тема: Оценка показателей безотказности изделий по данным эксплуатационных наблюдений.

Практическое занятие № 7.

Тема: Анализ безотказности функциональных систем методом структурных схем.

Практическое занятие № 8.

Тема: Анализ надежности безотказности функциональных систем методом логических схем.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

2.1. Практическое занятие № 1

Тема. Система стандартов «Надежность в технике». Основные термины и определения. Оценка показателей готовности изделий. - 2 часа.

Цель практического занятия: ознакомление с системой стандартов «Надежность в технике», изучение основных понятий, терминов и определений в области надежности техники. Оценка показателей готовности изделий.

Содержание практического занятия:

- 1) ознакомление с содержанием системы стандартов «Надежность в технике»;
- 2) ознакомление с новыми стандартами системы «Надежность в технике»;
- 3) изучение основных понятий, терминов и определений по ГОСТ Р 27.002 – 2009;
- 4) оценка показателей готовности изделий.

2.1.1. Система стандартов «Надежность в технике» включает в себя ряд групп стандартов, однородных по проблематике (аспектам стандартизации) (табл. 2.1.1).

Таблица 2.1.1

Содержание групп стандартов в соответствии с ГОСТ Р 27.001-2009.
«Надежность в технике. Система управления надежностью.
Основные положения»

Номер группы стандартов	Содержание стандартов в группе
0	основные понятия, термины и определения, основные положения и общие требования к СУН, состав и общие правила задания требований к надежности, модели отказов и др.;
1	программы обеспечения надежности, повышения надежности, отработки на надежность;
2	системные аспекты, классификация отказов и предельных состояний, управление риском проекта, стоимость жизненного цикла, экспертиза проекта и др.;
3	техника анализа и прогнозирования надежности, анализ риска;
4	испытания на надежность, обработка статистических данных (проверка однородности, выявление и анализ зависимостей и др.), планы испытаний для контроля безотказности, готовности, ремонтпригодности, методы подтверждения ремонтпригодности, оценка надежности по экспериментальным данным, методы форсированных испытаний;
5	сбор, обработка и представление информации о надежности, сбор данных, справочные данные.

Наименование стандарта включает в себя групповой заголовок «Надежность в технике», заголовок, отражающий аспект стандартизации (например, «Система управления надежностью», «Состав и общие правила задания требований к надежности» и т.п.).

Примечание - После заголовка наименование стандарта может включать в себя подзаголовок, уточняющий содержание (например, «Основные положения»).

Обозначение стандарта содержит:

- индекс ГОСТ Р;
- код (регистрационный номер системы) - 27;
- номер группы стандартов, соответствующий аспекту стандартизации;
- порядковый номер стандарта в группе;
- год принятия стандарта.

Например, ГОСТ Р 27.001-2009. «Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения» обозначает национальный стандарт, устанавливающий требования к системе управления надежностью, относится к группе 0 основополагающих стандартов с порядковым номером 01 и принят в 2009 году.

2.1.2. Новые государственные стандарты системы «Надежность в технике»:

ГОСТ Р 27.001-2009 «Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения» распространяется на изделия любых видов техники и устанавливает основные положения по управлению надежностью изделий при их разработке, производстве и поставке (в том числе при транспортировании, монтаже, установке, наладке), эксплуатации и утилизации, а также общий состав и структуру стандартов системы «Надежность в технике».

ГОСТ Р 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения» устанавливает термины и определения понятий в области надежности в технике. Термины, устанавливаемые настоящим стандартом, рекомендуются для применения во всех видах документации и литературы в области надежности в технике, входящих в сферу работ по стандартизации и (или) использующих результаты этих работ.

ГОСТ Р 27.004-2009 «Надежность в технике. Модели отказов» распространяется на изделия любых видов техники, для которых предусматривают и решают задачи прогнозирования безотказности и обработки статистических данных об отказах на различных стадиях их жизненного цикла.

ГОСТ Р 27.302-2009 «Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей» распространяется на невозстанавливаемые изделия любых видов техники, для которых на стадии разработки проводят анализ и прогнозирование безотказности.

ГОСТ Р 27.403-2009 "Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы" распространяется на изделия любых видов техники, для которых в документации задают требования к показателю безотказности - вероятности безотказной работы (ВБР). Настоящий стандарт устанавливает планы испытаний для проверки соответствия ВБР заданным требованиям.

Стандарт ГОСТ Р 27.404-2009 "Надежность в технике. Планы испытаний для контроля коэффициента готовности" распространяется на восстанавливаемые (ремонтируемые) изделия, распределение наработок между отказами которых аппроксимируют экспоненциальным распределением, и устанавливает планы контрольных испытаний для проверки соответствия коэффициента готовности заданным требованиям.

2.1.3. Основные термины и определения сгруппированы в настоящем пособии по следующим признакам:

- 1) термины, относящиеся к объектам;
- 2) термины, относящиеся к свойствам;
- 3) термины, относящиеся к состояниям;

- 4) термины, относящиеся к событиям;
- 5) термины, относящиеся к показателям:
 - 5.1) показатели безотказности;
 - 5.2) показатели долговечности,
 - 5.3) показатели сохраняемости,
 - 5.4) показатели ремонтпригодности,
 - 5.5) показатели готовности;
- 6) термины, относящиеся к испытаниям;
- 7) термины, относящиеся к анализу и нормированию;
- 8) термины, относящиеся к резервированию.

1). Термины, относящиеся к объектам

Изделие – любая функциональная единица, которую можно рассматривать в отдельности.

Составная часть – рассматриваемая часть изделия.

Восстанавливаемое изделие – изделие, которое при данных условиях после отказа может быть возвращено в состояние, в котором может выполнять требуемую функцию.

Невосстанавливаемое изделие – изделие, которое при данных условиях после отказа не может быть возвращено в состояние, в котором может выполнять требуемую функцию.

2). Термины, относящиеся к свойствам

Надежность – свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания.

Примечание. Данный термин используют только для общего неколичественного описания надежности.

Готовность – способность изделия выполнять требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Безотказность – способность изделия выполнять требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях.

Ремонтпригодность – способность изделия при данных условиях использования и технического обслуживания к поддержанию или восстановлению состояния, в котором оно может выполнять заданную функцию.

Долговечность – способность изделия выполнять заданную функцию до достижения предельного состояния при данных условиях использования и технического обслуживания.

Сохраняемость – способность изделия выполнять требуемую функцию в течение и после хранения и (или) транспортирования.

3). Термины, относящиеся к состояниям

Работоспособное состояние – состояние изделия, при котором оно способно выполнять требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы.

Неработоспособное состояние - состояние изделия, при котором оно не способно выполнять требуемую функцию по любой причине.

Исправное состояние^{**} - состояние изделия, при котором оно способно выполнять требуемую функцию и соответствует всем требованиям пользователя.

Неисправное состояние^{**} - состояние изделия, характеризующееся приемлемой для пользователя неполной способностью выполнять требуемую функцию, исключая такую неспособность во время профилактического технического обслуживания или других запланированных действий или из-за нехватки внешних ресурсов.

Состояние функционирования – состояние выполнения изделием требуемых функций.

Наработка^{*} – продолжительность или объем работы изделия.

Примечание – наработка может быть непрерывной величиной (продолжительность работы в часах) и дискретной величиной (число циклов, срабатываний, запусков и т.п.).

Состояние нефункционирования – состояние невыполнения изделием ни одной из требуемых функций.

Требуемое время - интервал времени, в течение которого потребитель требует, чтобы изделие находилось в работоспособном состоянии.

Состояние готовности - состояние нефункционирования изделия в требуемое время.

Предельное состояние – состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причинам опасности, экономическим или экологическим.

Критерий предельного состояния – признаки предельного состояния, по которым принимают решение о его наступлении.

4). Термины, относящиеся к событиям

Отказ – потеря способности изделия выполнять заданную функцию.

Критерий отказа – заранее оговоренные признаки нарушения работоспособности, по которым принимают решение о факте наступления отказа.

Причина отказа – обстоятельства в ходе разработки, производства или использования, которые привели к отказу.

Механизм отказа – физический или химический процесс, который приводит к отказу.

Повреждение – приемлемая для пользователя неполная способность изделия выполнять требуемую функцию.

5). Термины, относящиеся к показателям

5.1. Показатели безотказности

Вероятность безотказной работы – вероятность выполнить требуемую функцию при данных условиях в интервале времени (t_1, t_2) .

Обозначения: *) – определения соответствуют ГОСТ 27.002-1989, **) – определения предложены авторами.

*Интенсивность отказа**- условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента времени отказ не возник.

*Средняя наработка до отказа** – математическое ожидание наработки до отказа невосстанавливаемого изделия.

Гамма-процентная наработка до отказа – наработка, в течение которой отказ не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах.

*Параметр потока отказов**- отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую наработку к значению этой наработки.

*Средняя наработка на отказ**- отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки.

5.2. Показатели долговечности

Ресурс – суммарная наработка изделия в течение срока службы.

Средний ресурс - математическое ожидание ресурса.

Гамма-процентный ресурс – ресурс, в течение которого изделие не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

*Назначенный ресурс** - суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена.

Срок службы – продолжительность эксплуатации изделия или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Средний срок службы - математическое ожидание срока службы.

Гамма-процентный срок службы – срок службы, в течение которого изделие не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

*Назначенный срок службы**- календарная продолжительность эксплуатации изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена.

5.3. Показатели сохраняемости

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения изделия, в течение и после которого изделие способно выполнять требуемую функцию.

Гамма-процентный срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения изделия, в течение и после которого изделие способно выполнять требуемую функцию с вероятностью γ , выраженной в процентах.

5.4. Показатели ремонтпригодности

Интенсивность восстановления $\mu(t)$ - предел, если он существует, отношения условной вероятности корректирующего ремонта в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ к длине этого интервала Δt , стремящейся к нулю, при условии, что ремонт был начат во время $t = 0$ и не был закончен до времени t .

*Среднее время восстановления работоспособного состояния** - математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния.

Вероятность восстановления работоспособного состояния *- вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния не превысит заданного.

Гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого восстановление будет осуществлено с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средняя продолжительность ТО (ремонта) – математическое ожидание продолжительности ТО (ремонта).

Средняя трудоемкость восстановления работоспособного состояния *- математическое ожидание трудоемкости восстановления работоспособного состояния.

Средняя стоимость восстановления работоспособного состояния *- математическое ожидание стоимости восстановления работоспособного состояния.

Удельное время восстановления работоспособного состояния *- время восстановления работоспособного состояния на 1 ч налета.

Удельная трудоемкость восстановления работоспособного состояния *- трудоемкость восстановления работоспособного состояния на 1 ч налета.

Удельная стоимость восстановления работоспособного состояния *- стоимость восстановления работоспособного состояния на 1 ч налета.

5.5. Показатели готовности

Коэффициент готовности (в области надежности в технике) – вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии, определенная в соответствии с проектом при заданных условиях функционирования и технического обслуживания .

Коэффициент оперативной готовности - вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнит функцию при данных условиях в интервале (t_1, t_2) .

Коэффициент технического использования (в области надежности в технике) - доля времени нахождения изделия в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации в заданном интервале времени , включая все виды технического обслуживания.

Коэффициент сохранения эффективности – отношение значения показателя эффективности применения изделия за определенный период эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы изделия в течение этого периода не произойдут.

б). Термины, относящиеся к испытаниям

Испытание – определение одной или нескольких характеристик согласно установленной процедуре (ГОСТ Р ИСО 9000-2000, статья 3.8.3).

План испытаний – совокупность правил продолжения или завершения испытаний в зависимости от наработки испытуемых изделий или от суммарного числа наблюдений и числа отказов, произошедших к данному моменту времени испытаний.

7). Термины, относящиеся к анализу и нормированию

Прогнозирование – вычислительный процесс, направленный на предсказание значений количественных характеристик.

Модель безотказности – математическая модель, используемая для прогнозирования или оценки показателей безотказности.

Анализ видов и последствий отказов – качественный метод анализа, основанный на исследовании возможных видов отказов и неисправностей составных частей и их влияния на изделие.

Анализ видов, последствий и критичности отказов – количественный или качественный метод анализа, основанный на анализе видов и последствий отказов вместе с рассмотрением вероятности возникновения видов отказов и серьезности последствий.

Нормирование надежности – установление количественных и качественных требований к надежности.

Распределение требований – процедура, применяемая в процессе проектирования изделия, посредством которой требования к надежности изделия распределяют на его составные части по определенным правилам.

8). Термины, относящиеся к резервированию

Резервирование – наличие в изделии больше одного средства, необходимого для выполнения требуемой функции.

Нагруженное резервирование – резервирование, при котором все средства, способные выполнять требуемую функцию, работают одновременно.

Резервирование замещением – резервирование, при котором часть средств, способных выполнять требуемую функцию, предназначена для работы, а остальная часть средств не работает до момента появления необходимости в ней.

Резервирование m из n – резервирование, при котором m изделий из общего числа n должны функционировать для выполнения заданной функции.

Смешанное резервирование – резервирование, обеспечивающее выполнение требуемой функции несколькими различными средствами (или) способами.

Отказобезопасность – свойства изделия, ориентированные на сохранение безопасности в случае отказа.

2.1.4. Оценка показателей готовности изделий

Последовательность выполнения задания:

1) получение варианта исходных данных для расчета комплексных показателей. Исходные данные представлены в табл. 2.1.3;

2) расчетный вариант задается преподавателем путем увеличения величины интервала Δt в α раз ($\alpha=0,1 \dots 0,5$);

3) оценка показателей готовности изделий по формулам, пользуясь табл. 2.1.2.

2.1.5. Составление отчета по результатам выполнения практического занятия № 1, содержащего:

- наименование практического занятия;

- цель, задачи практического занятия;
- содержание системы «Надежность в технике» в соответствии с ГОСТ Р 27.001-2009;
- основные понятия, термины и определения надежности;
- оценка показателей готовности изделий;
- выводы по практическому занятию № 1.

Таблица 2.1.2

Оценка показателей готовности изделий

п/п	Наименование показателя	Определение	Расчетная формула	Примечание
1	2	3	4	5
1.	Коэффициент готовности, K_{Γ}	Вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии, определенная в соответствии с проектом при заданных условиях функционирования и технического обслуживания	$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N T_{\text{раб}}} =$ $= \frac{T_0}{T_0 + t_{\text{в ср}}}$	t_i – время пребывания i - го изделия в работоспособном состоянии; $T_{\text{раб}}$ – продолжительность эксплуатации; $T_{\text{раб}}$ –наработка на отказ; $t_{\text{в ср}}$ - среднее время восстановления
2.	Коэффициент оперативной готовности	Вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнит функцию при данных условиях в интервале (t_1, t_2) .	$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} P(t)$ $P(t) = e^{-\omega_{\text{ср}} t}$	$\omega_{\text{ср}}$ –параметр потока отказов; t – заданный интервал времени

Таблица 2.1.3

Исходные данные для оценки показателей готовности изделий

Исходные данные	Количество отказов, Δn в интервале наработки					Количество восстановлений, Δm в интервалах времени				
	0-400	400-800	800-1200	1200-1600	1600-2000	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3
Интервал времени, t_1, t_2										
Количество событий	10	12	7	14	8	10	15	20	10	12
N	200					67				

2.2. Практическое занятие № 2

Тема: Модели надёжности невосстанавливаемых изделий.

Цель: Изучение распределений непрерывной случайной величины - наработки до отказа невосстанавливаемых изделий.

2.2.1. Необходимые теоретические сведения

Поскольку факторы, влияющие на отказ объекта, носят случайный характер, то отказ объекта является случайным событием, а время работы (наработка) объекта до отказа представляет собой случайную величину.

Эти случайные величины подчиняются определенным закономерностям, которые выражаются законами распределения случайных величин.

Для невосстанавливаемых изделий в качестве моделей надежности рассматриваются законы распределения наработки до отказа (непрерывных случайных величин): экспоненциальный, нормальный и закон распределения Вейбулла. Характеристики этих законов приведены (табл. 2.2.1, табл. П.1).

Установление закономерностей основывается на обработке статистических данных – наработки изделий до отказа, полученных в результате эксплуатационных наблюдений (испытаний). В табл. 2.2.2 приведены расчетные формулы для показателей безотказности невосстанавливаемых объектов.

2.2.2. Последовательность выполнения работы

1. Получение варианта исходных данных, приведенных в табл. 2.2.3. Помимо приведенных в таблице вариантов преподаватель может выдать дополнительные данные.

2. Построение вариационного ряда, если исходные данные о наработках до отказа даны не в порядке возрастания.

3. Разбиение вариационного ряда на интервалы. Приближенная оценка ширины интервала может быть сделана по формуле

$$\Delta \tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{1 + 3,2 \lg n}, \quad (2.2.1)$$

где τ_{\max}, τ_{\min} - максимальное и минимальное значение периода наблюдений, n - количество наблюдаемых объектов.

4. Определение статистических значений $P^*(t), q^*(t), f^*(t), \lambda^*(t)$ и построение гистограмм этих характеристик.

5. Сравнение гистограмм $f^*(t), \lambda^*(t)$ с графиками теоретических кривых законов распределения, приведенными на рис. 2.2.1, и выдвижение гипотезы о виде закона распределения рассматриваемой случайной величины.

6. Проверка гипотезы о законе распределения и оценка параметров распределения с помощью вероятностной бумаги по методике, приведенной в п. 2.2.3.

7. Оценка теоретических значений $P(t), q(t), f(t), \lambda(t)$ и построение этих теоретических зависимостей (табл. 2.2.1, табл. П.1, табл. П.2).

8. Определение вероятности безотказной работы за наработку $t = 600$ часов.

9. Определение средней наработки до отказа T_{cp} .

10. Оформление результатов выполненных расчетов по форме табл. 2.2.4.

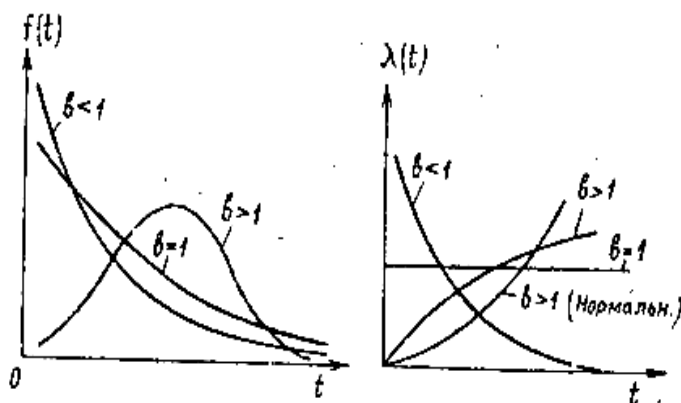


Рис. 2.2.1. Теоретические зависимости $f(t), \lambda(t)$ для различных законов распределения: экспоненциального ($b=1$), нормального ($b>1$), Вейбулла ($b<1, b>1$)

2.2.3. Вероятностная бумага представляет собой координатную сетку, рассчитанную для определенного закона распределения случайной величины: для экспоненциального распределения (рис. 2.2.2), для нормального распределения (рис. 2.2.3), для распределения Вейбулла (рис. 2.2.4).

Вероятностная бумага выбирается по выдвинутой гипотезе о законе распределения наработки до отказа. На бумагу наносятся точки с координатами $(q^*(t), t)$: по оси абсцисс откладывается значение наработки t , по оси ординат - соответствующее значение частоты $q^*(t) = 1 - P^*(t)$.

Гипотезу о законе распределения наработки до отказа считают подтвержденной, если построенные точки легли на прямую, в противном случае гипотеза отвергается.

Оценка параметров закона распределения наработки до отказа определяется по вероятностной бумаге по следующим правилам:

а) оценка параметра λ с помощью экспоненциальной бумаги (рис. 2.2.2). За величину t_0 принимают абсциссу точки пересечения прямой с осью абсцисс, находят значение τ , соответствующее ординате 0.632, обозначают его τ^* , параметр λ оценивают по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{\tau^* - t_0};$$

б) оценка параметров T_{cp} и σ с помощью вероятностной бумаги нормального распределения (рис. 2.2.3). Параметр T_{cp} равен абсциссе, соответствующей накопленной частоте 0.5, параметр σ равен разности абсцисс точек с накопленными частотами 0.5 и 0.159 ($\sigma = T_{cp} - T_{0.159}$);

в) оценка параметров a и b с помощью вероятностной бумаги распределения Вейбулла (рис. 2.2.4). При оценке параметров a и b используется специальная точка А с координатами (2.718; 0.632), вертикальная линия H с абсциссой I и специальная шкала m . Для оценки b следует найти значение ординаты по шкале m точки В, полученной на пересечении линии H и луча, проведенного через А параллельно линии, построенной по статистическим данным (линия Д).

На рис. 2.2.4 $b = 2.00$. Для оценки a следует найти ординату m_0 на шкале m точки С пересечения линии D с линией H . Параметр a находится по формуле:

$$a = e^{m_0} \cdot 10^{jb},$$

где j - порядок множителя шкалы времени.

На рис. 2.2.4: $j = 2$, $m_0 = 4.4$, $a = 182000$.

Таблица 2.2.1

Характеристики законов распределения наработки до отказа

Наименование закона распределения	Параметры	Математические выражения		Графики	
		Плотности распределения	Вероятность безотказной работы	Плотности распределения	Вероятности безотказной работы
1	2	3	4	5	6
Экспоненциальный	$S=1$ λ	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$P(t) = e^{-\lambda t}$		
Нормальный	$S=2$ T_{cp}, σ_t	$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma_t^2}}$	$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{(\tau-T_{cp})^2}{2\sigma_t^2}} d\tau$		
Вейбулла	$S=2$ a, b	$f(t) = \frac{b}{a} t^{b-1} e^{-\frac{1}{a} t^b}$	$P(t) = e^{-\left(\frac{1}{a} t\right)^b}$		

Таблица 2.2.2

Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий

№	Наименование показателей	Определения	Расчетные формулы		Примечания
			теоретические	статистические	
1	2	3	4	5	6
1	Вероятность безотказной работы, $P(t)$	Вероятность выполнить требуемую функцию при данных условиях за время t	$P(t) = 1 - F(t)$	$P^* = 1 - \frac{n(t)}{N}$	t - наработка объекта, ч $F(t)$ - функция распределения наработки до отказа, $n(t)$ -количество отказов за время (наработку) t , N - количество объектов, находящихся под наблюдением
2	Плотность вероятности наработки до отказа, $f(t)$	Плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая для наработки t	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$f^*(t) = \frac{\Delta n}{N\Delta t}$	Δn - количество отказов в интервале Δt , Δt - интервал времени (наработки)
3	Интенсивность отказов, $\lambda(t)$	Условная плотность распределения случайной величины t на интервале Δt , при условии, что до начала интервала отказ не произошел	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} =$ $= -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} =$ $= \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$	$\lambda^*(t) = \frac{\Delta n}{[N - n(t)]\Delta t}$	

Продолжение табл. 2.2.2

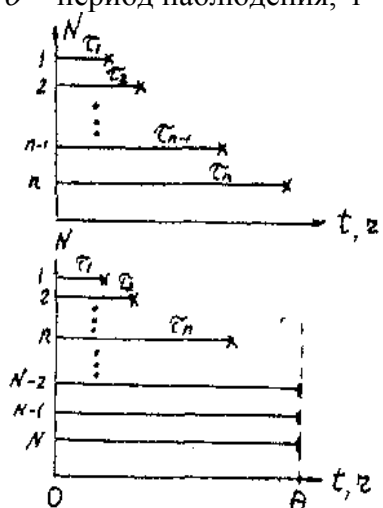
1	2	3	4	5	6
4	Средняя наработка до отказа, T_{cp}	Математическое ожидание наработки до отказа невосстанавливаемого изделия	$T_{cp} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt =$ $= \int_0^{\infty} t dF(t)$	Полная выборка $n = N$ $T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N}$ Усеченная выборка $n < N$ $T_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} + \frac{(N-n)}{n} \theta$	θ - период наблюдения, ч 

Таблица 2.2.3

Статистические данные для расчета
 $N = n = 40$ (полная выборка)

№ п/п	Наработка до отказа (τ, ч)				
	I вариант	II вариант	III вариант	IV вариант	V вариант
1	2	3	4	5	6
1	400	470	156	56	570
2	420	500	197	97	600
3	430	600	300	200	700
4	445	760	397	296	860
5	450	785	500	400	885
6	455	800	600	500	900
7	460	850	700	600	951
8	470	890	750	650	992
9	480	955	800	700	1050
10	482	980	800	702	1080
11	485	1000	850	749	1100
12	490	1030	870	760	1130
13	490	1055	890	790	1155
14	500	1070	900	810	1170
15	500	1085	930	830	1185
16	520	1100	945	845	1210
17	550	1135	955	855	1235
18	560	1150	970	870	1250
19	560	1170	970	875	1270
20	590	1200	980	880	1300
21	630	1250	1000	900	1350
22	650	1275	1120	1020	1375
23	680	1300	1200	1100	1410
24	715	1320	1250	1150	1420
25	770	1350	1300	1210	1450
26	800	1420	1420	1320	1510
27	910	1450	1475	1370	1560
28	1000	1470	1500	1400	1570
29	1030	1485	1500	4405	1580

1	2	3	4	5	6
30	1060	1500	1600	1500	1600
31	1070	1600	1700	1600	1710
32	1100	1655	1800	1702	1755
33	1175	1675	1920	1815	1775
34	1250	1700	2000	1900	1805
35	1300	1750	2160	2050	1850
36	1370	1800	2250	2150	1900
37	1500	1950	2500	2400	2050
38	1550	2000	2750	2650	2100
39	2000	2050	3000	2900	2155
40	2400	2400	3280	3185	2500

Таблица 2.2.4

Расчет показателей безотказности невосстанавливаемых изделий

Исходные статистические данные	№ интервала	1	2	3	4	5
	$t_2 - t_1$					
	Δn					
Статистические характеристики N= n=	n(t)					
	$f^*(t)$					
	$\lambda^*(t)$					
	$P^*(t)$					
Гипотеза о законе распределения наработки до отказа	наименование					
	вид функции распределения					
Параметры закона распределения	λ					
	T_{cp} / σ					
	a / b					
Теоретические характеристики подтвержденного закона распределения	f(t)					
	P(t)					
Вероятность безотказной работы	P (t=600ч)					
Средняя наработка до отказа	T_{cp}					

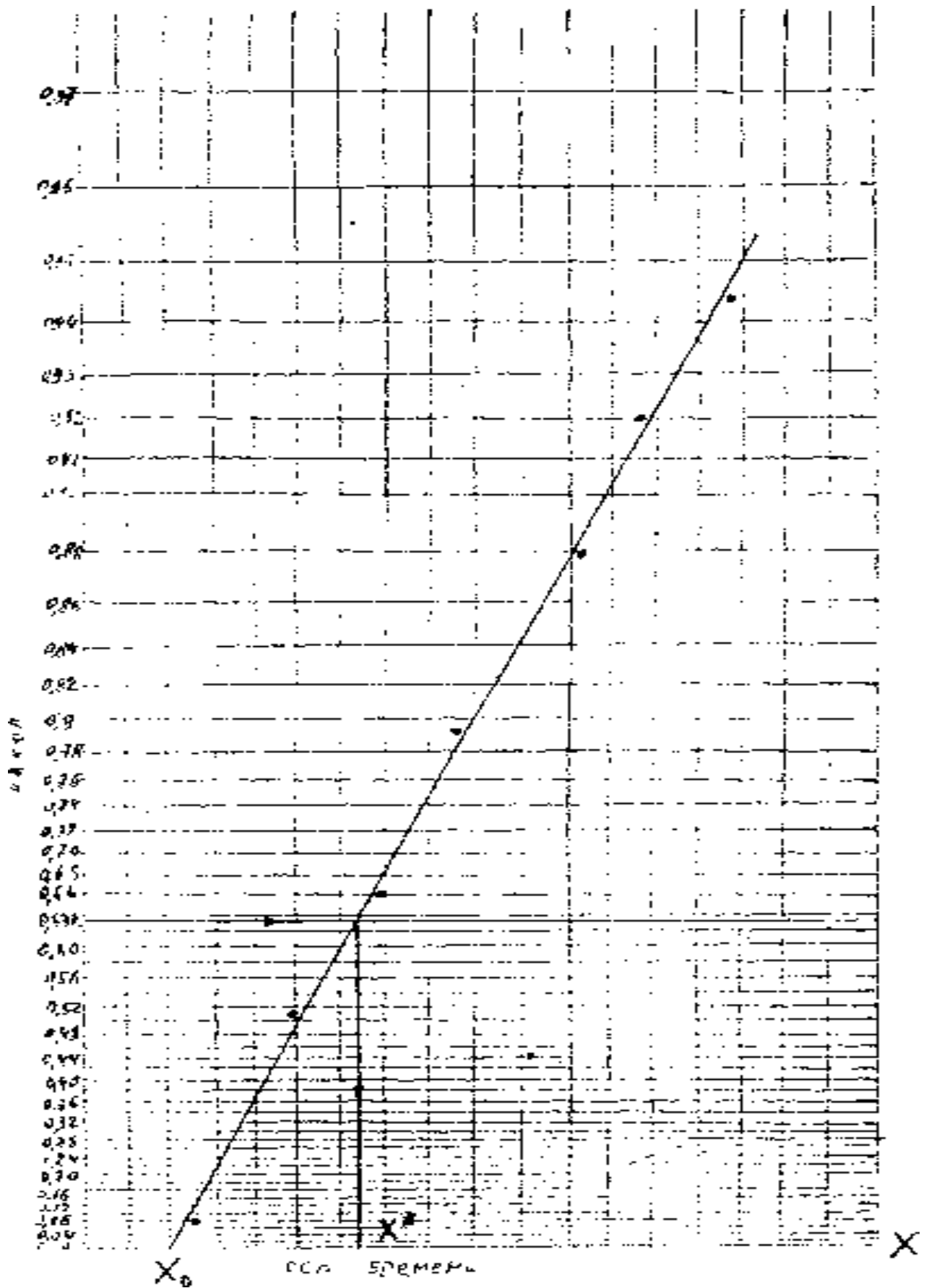


Рис. 2.2.2. Вероятностная бумага экспоненциального распределения

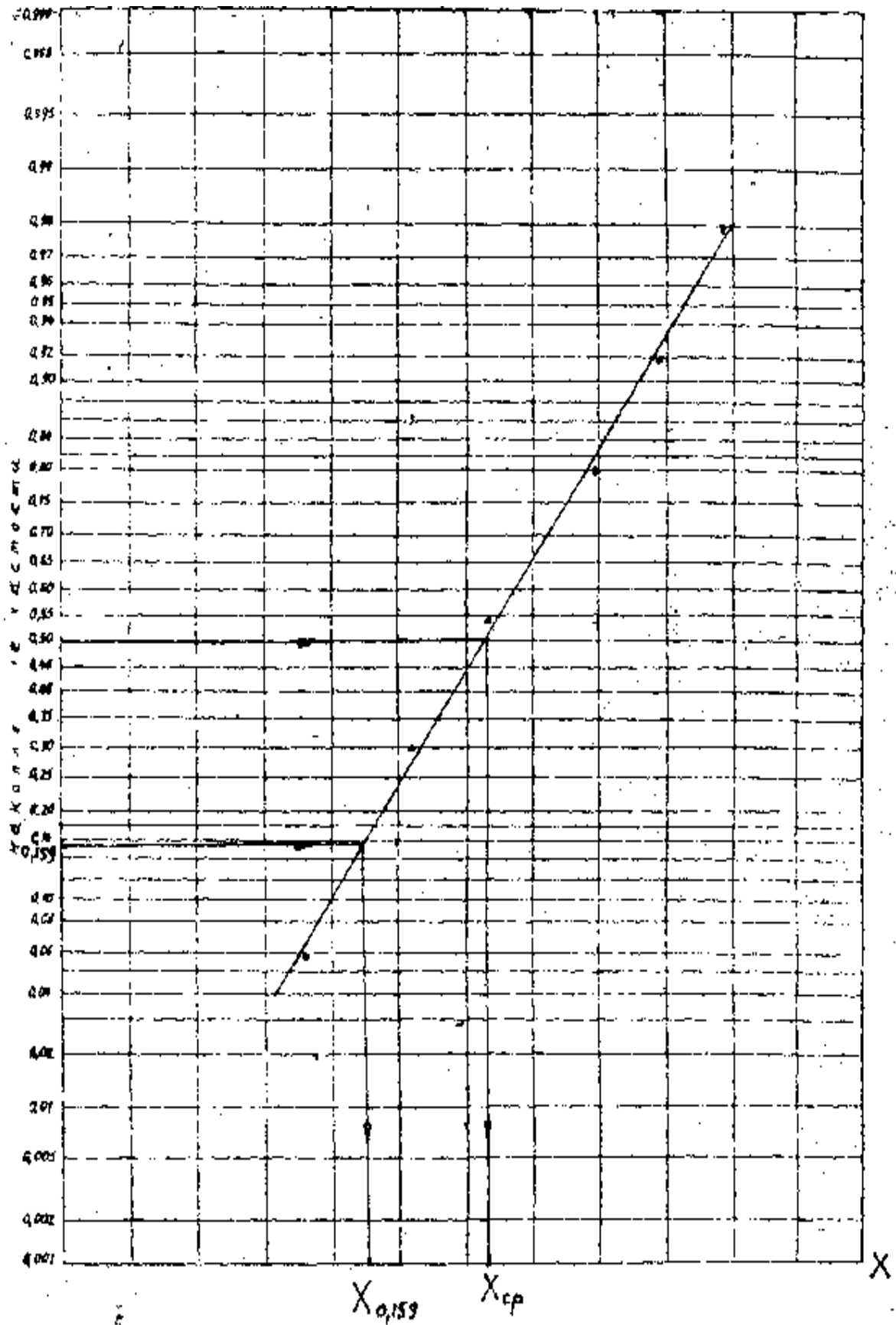


Рис. 2.2.3. Вероятностная бумага нормального распределения

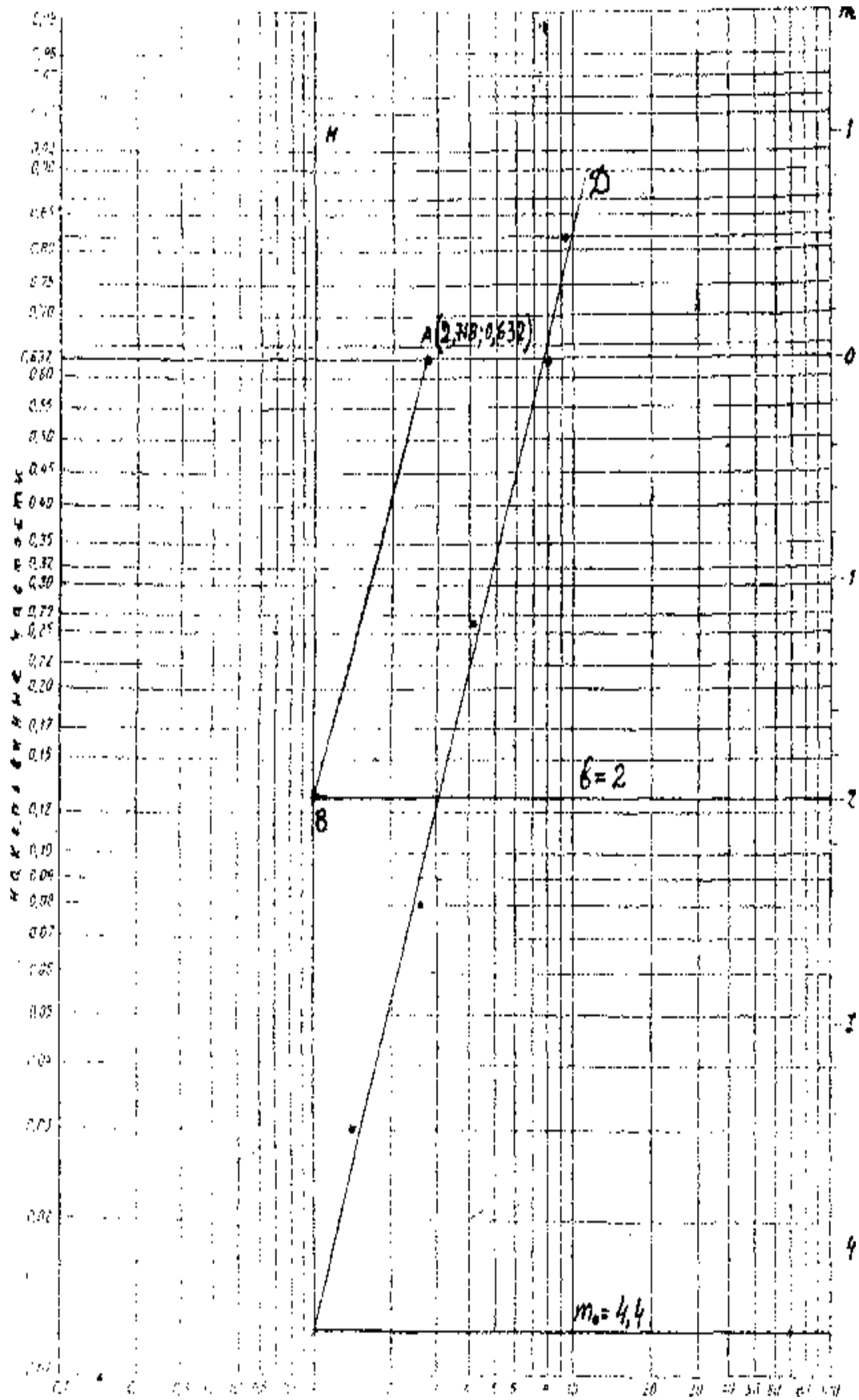


Рис. 2.2.4. Вероятностная бумага распределения Вейбулла

2.2.4. Составление отчета по результатам выполнения практического занятия № 2, содержащего:

- наименование практического занятия,
- цель, задачи практического занятия,
- оценка показателей надежности изделий непараметрическими методами;
- выводы по практическому занятию № 2.

2.3. Практическое занятие № 3

Тема: Модели надежности восстанавливаемых изделий.

Цель: Изучение распределенной случайной дискретной величины - количества отказов восстанавливаемых изделий за период наблюдения.

2.3.1 Необходимые теоретические сведения

Восстанавливаемый объект - объект, для которого в рассматриваемой ситуации предусмотрено восстановление работоспособного состояния.

Эксплуатация восстанавливаемых объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работу и работает до отказа, после отказа происходит восстановление работоспособности и объект вновь работает до отказа и т.д. При этом время восстановления не учитывается, т.е. учитывается только время наработки. Для таких объектов моменты отказов на оси суммарной наработки образуют поток отказов.

В качестве характеристики потока отказа используют "ведущую функцию" $\Omega(t)$ данного потока - математическое ожидание числа отказов за наработку t

$$\Omega(t) = M[r(t)], \quad (2.3.1)$$

где M - символ математического ожидания, $r(t)$ - число отказов за наработку t .

Параметр потока отказов $\omega(t)$ - производная от функции $\Omega(t)$ и характеризует число отказов в данный момент наработки t

$$\omega(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t}. \quad (2.3.2)$$

Связь параметра потока отказов с ведущей функцией определяется соотношением

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(x) dx. \quad (2.3.3)$$

Закон распределения количества отказов как дискретной случайной величины за период наблюдения может быть описан законом Пуассона

$$P(n, \omega, \tau) = \frac{(\omega\tau)^n}{n!} e^{-\omega\tau}, \quad (2.3.4)$$

где $P(n, \omega, \tau)$ - вероятность того, что рассматриваемое событие (отказ) за время τ появляется ровно n раз.

Для определения количества запасных частей r для замены отказавших изделий используется зависимость

$$\text{Pr}_{\text{дон}} = \sum_{n=0}^r \frac{(\omega\tau)^n}{n!} e^{-\omega\tau}, \quad (2.3.5)$$

где $\text{Pr}_{\text{дон}}$ - вероятность того, что для замены отказавших изделий будет достаточно r запасных частей.

При $r=0$ (не появление ни одного отказа) вероятность безотказной работы равна

$$P(\omega\tau) = e^{-\omega\tau}. \quad (2.3.6)$$

Формула справедлива при $\omega(t) = \text{const}$. В случае переменного значения параметров отказов, т.е. $\omega(t) \neq \text{const}$, вероятность безотказной работы в интервале (t_1, t_2) определяется по формуле:

$$P[\omega(t), t_1, t_2] = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt}. \quad (2.3.7)$$

Статистические расчеты, как и в случае определения показателей безотказности невосстанавливаемых изделий, проводятся путем разбиения всего периода наработки на интервалы. Однако смысл количества отказов за выделенный интервал наработки имеет в случае анализа показателей безотказности восстанавливаемых изделий свои особенности. Рассмотрим временную диаграмму отказов восстанавливаемых изделий (рис. 2.3.1):

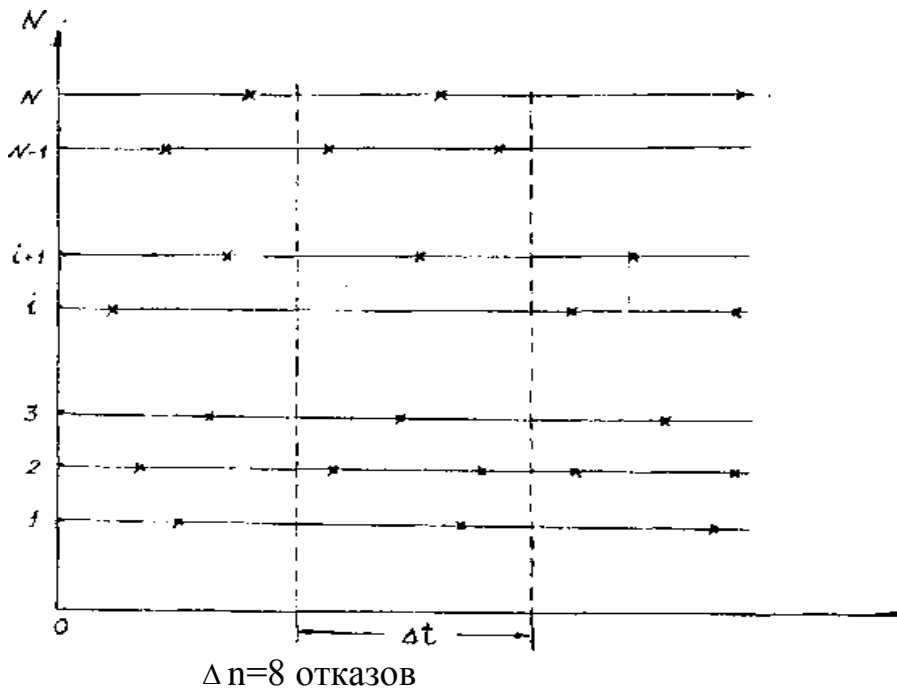


Рис. 2.3.1. Временная диаграмма отказов восстанавливаемых изделий

В расчете количества отказов за интервал Δt в этом случае берутся все отказы, в том числе и два или большее число отказов одного изделия, общее же

число изделий N остается одинаковым, несмотря на то, что в интервале Δt некоторые изделия не отказали.

Поэтому параметр потока отказов определяется зависимостью

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta n}{N\Delta t}. \quad (2.3.8)$$

Расчетные зависимости показателей безотказности восстанавливаемых изделий приведены в табл. 2.3.1.

Таблица 2.3.1

Показатели безотказности восстанавливаемых изделий

№	Наименование показателя	Обозначение	Определение	Расчетная формула		Примечание
				теоретическая	статистическая	
1	Параметр потока отказов	$\omega(t)$	Отношение среднего числа отказов восстанавливаемого изделия за произвольно малую наработку к значению этой наработки По табл. 2.2.2	$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t+\Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t}$ $= \Omega'(t),$ где $M[r(t+\Delta t)], M[r(t)]$ - математическое ожидание, Ω_t - ведущая функция $\Omega(t) = \int_0^t \omega(x) dx.$	$\omega^*(t) = \frac{\Delta n}{N\Delta t},$ где Δn - количество отказов на интервале Δt N - кол-во изделий	
2	Вероятность безотказной работы	$P(t_1, t_2)$	По табл. 2.2.2	При $\omega(t) = const$ $P(t) = e^{-\omega t}.$ При $\omega(t) \neq const$ $P(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt}$	По табл. 2.2.2	
3	Средняя наработка на отказ	T_0	Отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа отказов	$T_0 = \frac{t_2 - t_1}{M[r]},$ где $t_{1,2}$ - начало и конец периода наблюдений, $M[r]$ - математическое ожидание числа отказов	$T_0^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n r_i},$ где t_i - наработка i -го изделия за период наблюдения	Нарботка на один отказ в интервале суммарной наработки. При $\omega(t) = const$ $T_0 = \frac{1}{\omega}$

2.3.2. Последовательность выполнения работы

1. Получение варианта статистических данных для расчета. Варианты статистических данных приведены в табл. 2.3.3. Кроме указанных вариантов преподаватель может выдать дополнительные данные. Время наработки в табл. 2.3.2 разбито на одинаковые интервалы.

Таблица 2.3.2

Статистические данные для расчета $N=400$

Интервалы наработок часов	Количество отказов за интервал наработки				
	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант	5 вариант
0-300	6	9	5	6	20
300-600	7	12	10	12	18
600-900	6	20	7	14	25
900-1200	9	18	15	9	14
1200-1500	7	10	18	15	7
1500-1800	8	24	12	7	8
1800-2100	10	8	14	6	16
2100-2400	9	30	6	5	21

Таблица 2.3.3

Расчет показателей безотказности восстанавливаемых изделий

Исходные статистические данные	№ интервала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	$t_2 - t_1$										
	Δn										
Статистические значения	$\omega^*(t)$										
Теоретические значения	Закон распределения (наименование)	$\omega(t) =$									
	Вид функции распределения										
	$P(t)$ ($t=5000$ ч)	$P(t) =$									
	$P_r(t)$										
Искомые величины	Средняя наработка на отказ T_0	$T_0 =$									
	Количество запасных изделий при $T=1000$ ч	$n_{зан} =$									

2. Определение статистических значений и построение гистограмм $\omega^*(t)$, анализ характера изменения параметра потока отказов: $\omega^*(t)=\text{const}$ или $\omega^*(t)\neq\text{const}$.

3. Выбор зависимости для закона распределения.

4. Определение вероятности безотказной работы восстанавливаемых изделий за $t=300$ ч.

5. Определение средней наработки на отказ изделий.

6. Определение количества запасных изделий для восстановления эксплуатируемого парка самолетов за $t=1000$ ч. Расчеты выполнять, используя формулу (2.3.5).

7. Результаты расчетов представить по форме табл. 2.3.3.

2.3.3. Составление отчета по результатам выполнения практического занятия № 3, содержащего:

- наименование практического занятия;
- цель, задачи практического занятия;
- оценка показателей надежности восстанавливаемых изделий;
- выводы по практическому занятию № 3.

2.4. Практическое занятие № 4

Тема: Непараметрические методы оценки показателей надежности.

Цель: Изучение непараметрических методов определения показателей надежности изделий.

2.4.1. Необходимые теоретические сведения

Непараметрические методы оценки показателей надежности – методы, не предполагающие знания вида распределения генеральной совокупности. Название «непараметрические методы» подчеркивает их отличие от параметрических методов, в которых предполагается, что генеральное распределение известно с точностью до конечного числа параметров. Классификация методов оценки показателей надежности приведена на рис. 2.4.1.

Непараметрические методы позволяют по результатам наблюдений оценивать неизвестные значения показателей. Для нахождения точечных оценок показателей надежности наибольшее распространение получил метод максимального подобия. Перечень показателей надежности и их расчетные формулы приведены в табл. 2.4.1.

2.4.2. Последовательность выполнения работы

1. Получение варианта статистических данных для оценки показателей надежности (табл. 2.4.2). Для получения исходных статистических данных вариантов следует Δt , Δt_g , Δt_c увеличить в α раз ($\alpha=1-6$ назначается преподавателем).

2. Пользуясь формулой, приведенной в табл. 2.4.1, рассчитать приведенные в этой таблице показатели надежности.

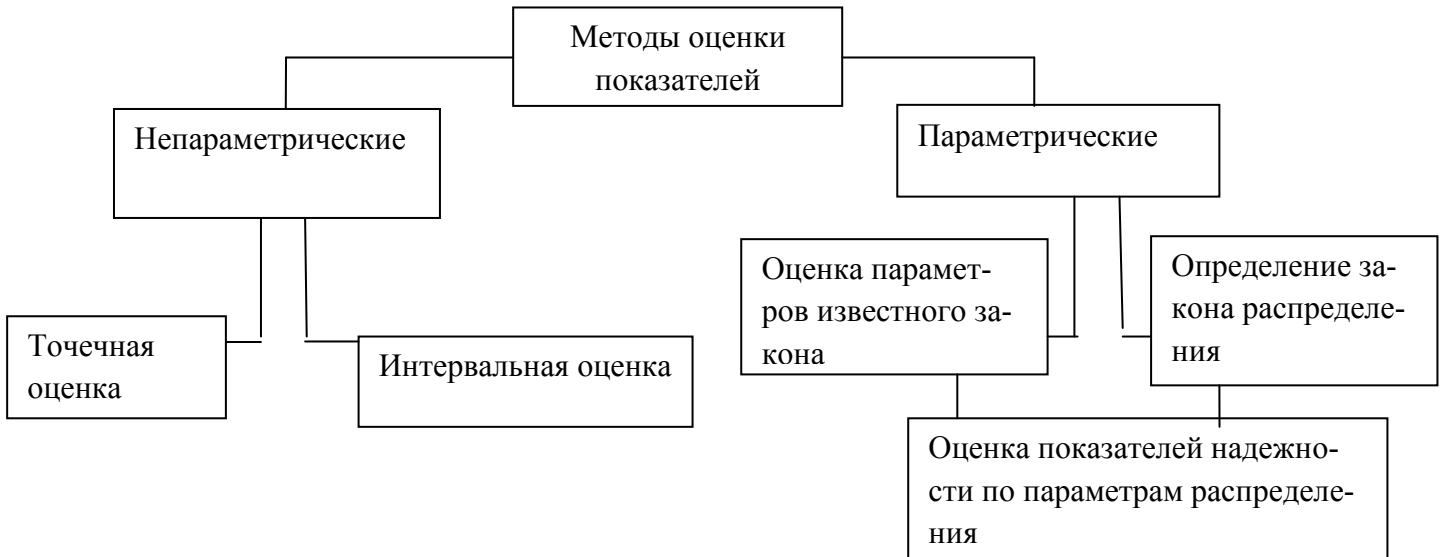


Рис.2.4.1. Классификация методов оценки

Таблица 2.4.1

Оценка показателей надежности непараметрическими методами

Свойства надежности	Наименование	Расчетная формула	Обозначения
1	2	3	4
Безотказность	Вероятность безотказной работы, $P(t)$	$P = 1 - \frac{n(t)}{N}$	$n(t)$ – количество отказов за период наблюдения; N – общее количество изделий под наблюдением
	Средняя наработка до отказа, T_{cp}	$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$ (полная выборка) $T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} + \frac{(N-n)\theta}{n}$ (усеченная выборка)	t_i – наработка до i -го отказа; θ – период наблюдения в часах наработки
	Интенсивность отказов, $\lambda(t)$	$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{[N - n(t)]\Delta t}$	Δn – количество отказов за период наблюдения Δt ; $n(t)$ – количество отказов, накопленное на начало исследуемого интервала Δt
	Средняя наработка на отказ, T_0	$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$	
	Параметр потока отказов, $\omega(t)$	$\omega(t) = \frac{\Delta n}{N\Delta t}$	

Продолжение табл. 2.4.1

1	2	3	4
Долговечность	Средний ресурс, $T_{p\text{ ср}}$	$T_{p\text{ ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n t_i \cdot \Delta n_i$	
	Гамма – процентный ресурс, $T_{p\gamma}$	$T_{p\gamma} = T_{p\text{ ср}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right)$	γ – заданная вероятность, выраженная в процентах, с которой объект в течение наработки T_p не достигает предельного состояния
Ремонтопригодность	Вероятность восстановления работоспособного состояния, $P(t_B)$	$P(t_B) = \frac{n(t_B < t_{\text{зад}})}{N_B}$	t_B – время восстановления i -го объекта; N_B – количество фиксированных временем восстановлений объекта за установленный период наблюдения; $n(t_B < t_{\text{зад}})$ – количество раз, когда время восстановления превышает заданное время восстановления объекта за установленный период времени.
	Среднее время восстановления работоспособного состояния, $t_{B\text{ ср}}$	$t_{B\text{ ср}} = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^N t_{B_i} \Delta n_i$	
Сохраняемость	Средний срок сохраняемости, $T_{c\text{ ср}}$	$T_{c\text{ ср}} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^N t_{c_i}$	t_{c_i} – срок сохраняемости i -го объекта; N_c – количество фиксированных сроков сохраняемости объекта
	Гамма-процентный срок сохраняемости, $T_{c\gamma}$	$T_{c\gamma} = t_{c\text{ ср}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right)$	

Таблица 2.4.2

Статистические данные для оценки показателей надежности

Невосстанавливаемые изделия		Восстанавливаемые изделия					
N=50		N=400		N _B =108		N _c =60	
$\Delta t, \text{ч}$	Δn	$\Delta t, \text{ч}$	Δn	$\Delta t_B, \text{ч}$	Δn_B	$\Delta t_c, \text{лет}$	Δn_c
0-500	2	0-1000	5	0-1	13	0-3	10
500-1000	7	1000-2000	7	1-1,5	15	3-6	15
1000-1500	9	2000-3000	3	1,5-2	21	6-9	14
1500-2000	15	3000-4000	8	2-2,5	17	9-12	9
2000-2500	8	4000-5000	6	2,5-3	24	12-15	8
2500-3000	6	5000-6000	2	3,5-4	18	15-18	4
3000-3500	3	6000-7000	4	4-4,5	20	18-21	5

2.4.3. Составление отчета по результатам выполнения практического занятия № 4, содержащего:

- наименование практического занятия;
- цель, задачи практического занятия;
- оценка показателей надежности изделий непараметрическими методами;
- выводы по практическому занятию № 4.

2.5. Практическое занятие № 5

Тема: Параметрические методы оценки показателей надежности.

Цель: Изучение параметрических методов определения показателей надежности изделий ЛА.

2.5.1. Необходимые теоретические сведения

В основу параметрических методов оценки показателей надежности положено предположение о виде закона распределения наработки до отказа.

Параметрический метод оценки показателей надежности базируется на использовании метода моментов для полных данных и метода максимального правдоподобия для усеченных (цензурированных) данных.

Метод моментов - метод определения параметров случайной величины по его моментам. Для этого используют начальные и центральные моменты.

Начальные моменты берутся относительно начала координат. Начальные моменты порядка S определяются зависимостью

$$\alpha_s = \sum_{j=1}^n X_j^s P_j, \quad (2.5.1)$$

где X_j^s - значения случайной величины,

P_j - вероятность ее появления.

В случае использования статистических гистограмм значение n означает число разбиения интервалов, X_j^s - координату середины j -го интервала, а P_j частость, соответствующую этому интервалу. Напомним, что частость определяется по статистическим данным:

$$P_j = \frac{\Delta n_j}{N}, \quad (2.5.2)$$

где n_j - число отказов, попавших в j -й интервал;

N - общее число отказов в случае полной выборки.

Математическое ожидание (среднее значение) величины X определяется как первый начальный момент, т.е. при $S=1$

$$\alpha_{s=1} = \sum_{j=1}^n X_j P_j = \bar{X}. \quad (2.5.3)$$

Центральные моменты - моменты относительно математического ожидания. Центральный момент порядка S определяется зависимостью:

$$\mu_s = \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^s P_j. \quad (2.5.4)$$

При $s=2$

$$\mu_{s=2} = \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2 P_j = D[X], \quad (2.5.5)$$

т.е. центральный момент второго порядка равен дисперсии случайной величины X .

Среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_x = D[X]. \quad (2.5.6)$$

Таким образом, для любой статистической совокупности независимо от вида распределения метод моментов позволяет определить среднее значение и среднее квадратичное отклонение. Для распространенных в теории надежности законов распределения методом моментов могут быть определены параметры:

для экспоненциального распределения

$$\lambda^* = \frac{1}{T_{cp}};$$

для нормального распределения

T_{cp} – математическое ожидание (2.5.3),

σ – среднее квадратичное значение (2.5.5).

Для распределения Вейбулла определение параметров: «а» - параметр масштаба и «b» - параметр формы может быть выполнено следующим образом: для математического ожидания \bar{X} и среднего квадратичного отклонения σ_x определяется коэффициент вариации

$$v = \frac{\sigma_x}{\bar{X}}. \quad (2.5.7)$$

По значению коэффициента вариации по табл. П. 1 определяем параметр распределения Вейбулла «b» и коэффициенты K_b и C_b .

Для определения параметра распределения Вейбулла «а» используются соотношения

$$\bar{X} = a K_b, \quad (2.5.8)$$

$$\sigma_x = a C_b. \quad (2.5.9)$$

Значение функции распределения Вейбулла может быть рассчитано по формуле:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{1}{a}x\right)^b}. \quad (2.5.10)$$

Метод моментов требует проверки предполагаемого закона распределения с помощью критериев согласия. Критерии согласия характеризуют степень расхождения между предположением о законе распределения и фактическими экспериментальными данными.

Наиболее распространенным критерием согласия является критерий Пирсона χ^2 (хи-квадрат).

Критерий χ^2 рассчитывается по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(\Delta n_j - N p_j)^2}{N p_j}, \quad (2.5.11)$$

где k – количество интервалов при обработке статистических наблюдений;

Δn_j – количество отказов, наблюдаемых в j – м интервале;

N – общее количество изделий, находящихся под наблюдением;

P_i – теоретическая (соответствующая предполагаемому закону распределения) вероятность нахождения случайной величины в j – м интервале.

Если X_j – правая граница j -го интервала и X_{j-1} – его левая граница, то

$$p_j = F(x_j) - F(x_{j-1}). \quad (2.5.12)$$

Значения $F(x_j)$ и $F(x_{j-1})$ определяются по табл. П.1.1.

Рассчитанное по формуле (2.5.11) значение $\chi_{расч}^2$ сравнивается с теоретическими значениями $\chi_{теор}^2$, которые определяются по табл. П.1.2 для χ^2 – распределения. В этой таблице значение аргумента χ^2 соответствует заданной вероятности $P(\chi^2)$, а величины $P(\chi^2)$ соответствуют уровням значимости α . Уровень значимости – это max допустимая вероятность неправильного отвержения гипотезы. Следовательно, малая величина $P(\chi^2)$ указывает на недостаточное согласие между гипотезой о законе распределения и наблюдениями. При $\chi_{расч}^2 > \chi_{теор}^2$ гипотеза отвергается, если $\chi_{расч}^2 \leq \chi_{теор}^2$ то гипотеза о соответствии экспериментальных данных предполагаемому закону распределения принимается.

2.4.2. Последовательность выполнения работы

1. Получение варианта статистических данных для расчета. Варианты данных эксплуатационных наблюдений приведены в табл. 2.5.1.

2. Определение статистических характеристик $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$, $P^*(t)$ и $F^*(t)$, построение гистограмм $\lambda^*(t)$ и $\lambda^*(t)$.

3. Путем сравнения гистограмм $f^*(t)$ и $\lambda^*(t)$ с теоретическими кривыми $f(t)$ и $\lambda(t)$ (рис. 2.2.1) выдвигается гипотеза о законе распределения.

4. Методом моментов определяются статистические характеристики этого закона.

5. Расчет значений $\chi_{расч}^2$ и определение по табл. П.3 $\chi_{теор}^2$, обоснование вывода о соответствии статистических данных сделанному предположению о законе распределения.

6. Оценка средней наработки до отказа изделия T_{cp} и вероятность безотказной работы $P(t)$ за наработку $t=300$ ч. При оформлении расчетов использовать форму табл. 2.5.2.

Таблица 2.5.1

Данные эксплуатационных наблюдений за изделиями АТ

	$\Delta t, \text{ч}$	0-1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	N
1 вар.	Δn	5	8	10	7	4	34
2 вар.	Δn	15	20	25	24	10	94
3 вар.	Δn	7	10	9	8	6	40
4 вар.	Δn	6	15	23	14	5	63
5 вар.	Δn	21	14	8	5	2	50

Таблица 2.5.2

Оценка показателей надежности параметрическим методом

Исходные данные	Δt					
	Δn					
Статистическая характеристика	$f^*(t)$					
	$\lambda^*(t)$					
	$P^*(t)$					
Гипотеза о законе распределения	Наименование закона: $f(t) =$					
Статистические параметры закона	$\lambda^* =$	$\bar{T}^* =$	$\sigma =$			
Уравнение моментов						
Критерий χ^2	p_j					
	Δn_j					
	$\Delta n_j - N p_j$					
	$\chi^2 = \frac{(\Delta n_j - N p_j)^2}{N p_j}$					
	$\chi^2_{расч} =$	$\chi^2_{теор} =$				
Вывод	Гипотеза..... законе распределения (не)принимается					
Показатели надежности	$T_{cp} =$	$P(t = 300 \text{ ч}) =$				

2.5.3. Составление отчета по результатам выполнения практического занятия № 5, содержащего:

- наименование практического занятия;
- цель, задачи практического занятия;
- оценка показателей надежности изделий параметрическими методами;
- выводы по практическому занятию № 5.

2.6. Практическое занятие № 6

Тема: Оценка показателей надежности по данным эксплуатационных наблюдений.

Цель: Научиться строить временные диаграммы и оценивать показатели надежности по эксплуатационным данным.

2.6.1. Необходимые теоретические сведения

Эксплуатационные наблюдения – процесс, обеспечивающий получение достоверной информации о надежности наблюдаемых объектов.

План наблюдений – число объектов наблюдения, порядок проведения наблюдений и критерии их прекращения.

Для проведения эксплуатационных наблюдений устанавливаются планы наблюдений: $[NUT]$, $[NUR]$, $[NRT]$, $[NRr]$, $[NMT]$, $[NMr]$, где: N – количество наблюдаемых объектов; U – отказавшие объекты при наблюдениях не заменяются; R – отказавшие объекты при наблюдениях заменяются; M – отказавшие объекты при наблюдениях восстанавливаются; T – наблюдения проводятся до наработки T ; r – наблюдения проводятся до отказа r объектов.

Наблюдение за эксплуатацией невосстанавливаемых изделий в течение периода времени T соответствует плану $[NUT]$, наблюдение за эксплуатацией восстанавливаемых изделий АТ в течение времени T соответствует плану $[NRT]$.

Статистические данные об отказах изделий могут быть представлены в виде цензурированных выборок.

Цензурированием называется событие, приводящее к прекращению наблюдений за изделием до наступления системного события (например, отказа) либо к свершению события в неизвестный момент времени в пределах некоторого интервала.

Цензурированной выборкой называется выборка, элементами которой являются полные наработки и наработки до цензурирования (неполные наработки) или только значения наработки до цензурирования. Полной наработкой является наработка изделия от начала некоторого этапа его эксплуатации до отказа (наработка до отказа). Неполная наработка характеризует наработку изделия от начала эксплуатации до прекращения наблюдений (до цензурирования).

Таблица 2.6.1

Примеры построения временных диаграмм

План наблюдений, вид выборки	Построение диаграмм по данным КУН	Построение ранжированных временных диаграмм
1. План $[NUT]$, полная выборка: $N=5, n=5$		
2. План $[NUT]$, усеченная выборка: $N=6, n=4$		
3. План $[NRT]$, усеченная выборка $N=12, n=6$		

Различают однократно и многократно цензурированные выборки. К *однократно цензурированным выборкам* относят выборки, содержащие полные и неполные наработки, причем все неполные наработки равны друг другу. Если у объектов наблюдения моменты или интервалы цензурирования различаются, то такие выборки являются *многократно цензурированными выборками*.

План эксплуатационных наблюдений $[NUT]$ указывает, что под наблюдением находится N объектов, отказавшие объекты не заменяются и не восстанавливаются U , наблюдения заканчиваются по истечении заданного интервала времени T (однократно цензурированная выборка).

При цензурировании по плану эксплуатационных наблюдений [NUr] заранее задается число отказов, после наступления которых наблюдения прекращаются, время наблюдения заранее не фиксируется, т.е. оно случайно (многократно цензурированная выборка).

При эксплуатации изделий АТ данные о наработке до отказа изделия накапливаются в карточках учета неисправностей (КУН). Для обработки статистических данных, накопленных при эксплуатации парка ЛА, строятся временные диаграммы наработки до отказа (табл. 2.6.1).

Ранжированные временные диаграммы наработок изделий до отказа показаны для однократно цензурированной выборки на рис. 2.6.1 и для многократно цензурированной выборки на рис. 2.6.2.

Таблица 2.6.2

Статистические данные наработок до отказа и цензурирования изделий СКВ самолета Як-40

№ варианта	Изделие	Объем парка	Количество на самолете	Наработка до отказа, ч	Наработка до цензурирования, ч
1	Заслонка 4064АТ	15	1	725; 780; 840; 890; 910; 915; 945; 980; 1025; 1038; 1200; 1310; 1820; 1950; 2400	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 15$ $m_1 = 5$ по 800 ч $m_2 = 5$ по 1500 ч $m_3 = 5$ по 2400 ч
2	Обратный клапан 1327	20	6	125; 130; 185; 210; 230; 235; 240; 257; 310; 320; 345; 400; 470; 520; 710	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 75$ $m_1 = 25$ по 200 ч $m_2 = 25$ по 630 ч $m_3 = 25$ по 710 ч
3	Обратный клапан 4488Т	25	2	370; 410; 425; 500; 560; 575; 582; 600; 610; 620; 655; 720; 810; 815; 900	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 15$ $m_1 = 5$ по 500 ч $m_2 = 5$ по 720 ч $m_3 = 5$ по 900 ч
4	Турбохолодильник 4629Т	15	1	1050; 1120; 1140; 1185; 1210; 1245; 1370; 1420; 1545; 1670; 2100; 2500	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 48$ $m_1 = 18$ по 1350 ч $m_2 = 10$ по 1670 ч $m_3 = 20$ по 2500 ч
5	Регулятор избыточного давления 1408Т	30	1	1370; 1450; 1520; 1610; 1620; 1740; 1800; 1850; 1950	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 45$ $m_1 = 15$ по 1400 ч $m_2 = 20$ по 1570 ч $m_3 = 10$ по 1900 ч

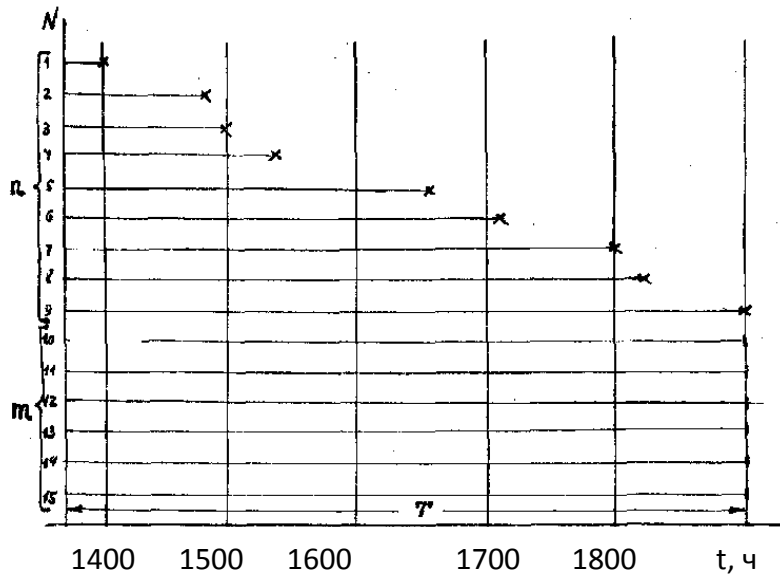


Рис. 2.6.1. Ранжированная временная диаграмма наработок до отказа $t_i, i = \overline{1, n}$, и наработок до цензурирования $\tau_j, j = \overline{1, m}$ (однократно цензурированная выборка)

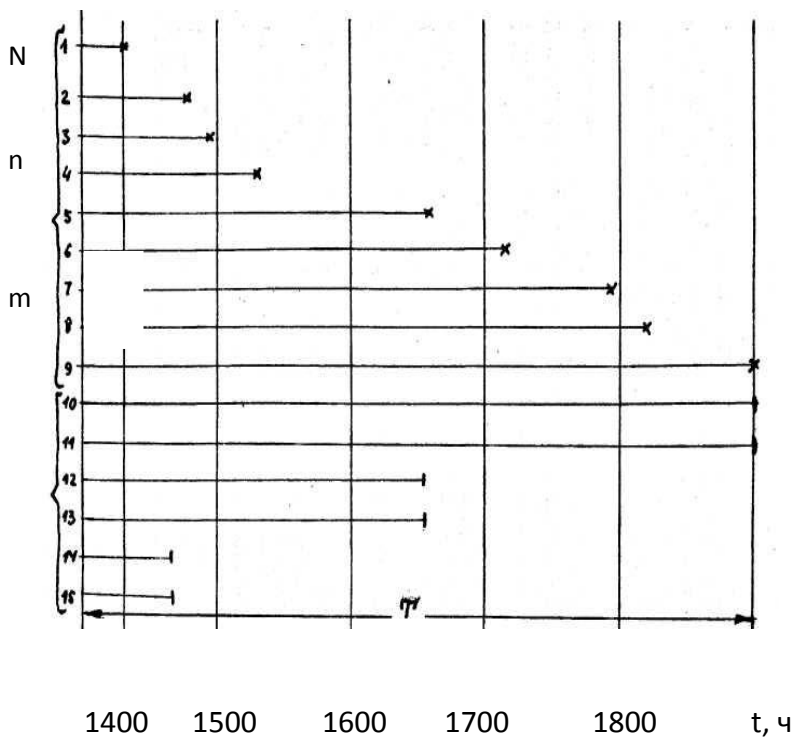


Рис. 2.6.2. Ранжированная временная диаграмма наработок до отказа $t_i, i = \overline{1, n}$, и наработок до цензурирования $\tau_j, j = \overline{1, m}$ (многократно цензурированная выборка)

2.6.2. Последовательность выполнения работы

1. Получение варианта исходных данных для обработки. Исходные данные предоставляются преподавателем в виде некоторого количества КУН по одной из функциональных систем самолета (табл. 2.6.2).

2. Построить временную диаграмму, воспользовавшись данными о наработках до отказа, имеющихся в КУН.

3. Оценить безотказность изделия СКВ самолета Як-40 по формулам, приведенным в табл. 2.4.1.

2.6.3. Составление отчета по результатам выполнения практического занятия № 6, содержащего:

- наименование практического занятия;
- цель, задачи практического занятия;
- оценка показателей надежности изделий по данным эксплуатационных наблюдений;
- выводы по практическому занятию № 6.

2.7. Практическое занятие № 7

Тема: Анализ надежности функциональных систем методом структурных схем.

Цель: Приобрести навыки оценки надежности сложных систем методом структурных схем.

2.7.1. Необходимые теоретические сведения

Метод структурных схем применяется для оценки надежности однофункциональных систем. Особенностью применения метода является то, что структурная схема может включать только один вид отказа элементов сложной системы. Порядок применения метода состоит в следующем:

1. Анализируется принципиальная схема сложной системы, определяется функциональная связь между элементами и возможность работы системы при отказе элементов.

2. Строится структурная схема надежности системы, отражающая вероятность безотказной работы системы при рассмотрении безотказности ее элементов (табл. 2.7.1).

3. В качестве объекта анализа принята система кондиционирования воздуха самолета Як-40 (табл. 2.7.2, рис. 2.7.1).

Таблица 2.7.1

Расчет надежности функциональной системы методом структурной схемы


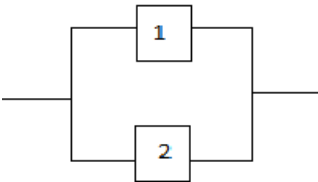
Вид соединения	Графическое изображение	Вероятность безотказной работы	Исходная информация
Последовательное		$P = P_1 P_2$	$P_1 = e^{-\lambda_1 t}$, $P_2 = e^{-\lambda_2 t}$ λ_1, λ_2 - интенсивности отказов элементов 1 и 2 при установившемся потоке отказов $\lambda = \omega$ t – время работы системы
Параллельное		$P = 1 - [(1 - P_1)(1 - P_2)]$	

Таблица 2.7.2

Система кондиционирования воздуха самолета Як-40

Позиции на схеме	Наименование агрегата	Тип агрегата	Количество на самолете
1, 7, 26	<i>Двигатели</i>	АН-25	3
2, 8, 16, 17, 19, 25	Обратный клапан	1327	6
3	Заслонка	4064АТ	1
4	Регулятор избыточного давления	4608Т	1
5	Дроссельная заслонка	1293ЕТ	1
6	Датчик расхода воздуха	2344ВТ	1
9	Турбохолодильник	4629Т	1
10	Датчик температуры	П-1Т	1
11	Обратный клапан	4488Т	1
12	Регулятор подачи воздуха	1408Т	1
13	Трубка Вентури		1
14	Биметаллический ограничитель температуры	1362	1
15	Заслонка		1
18	Обратный клапан	4488Т	1
20	Блок управления	4827АТ	1
21	Блок заслонок	1932Т	1
22	ВВР	4603Т	1
23	Радиатор подогрева воздушного клапана среднего двигателя		1
24	Командный прибор	4211БТ	1

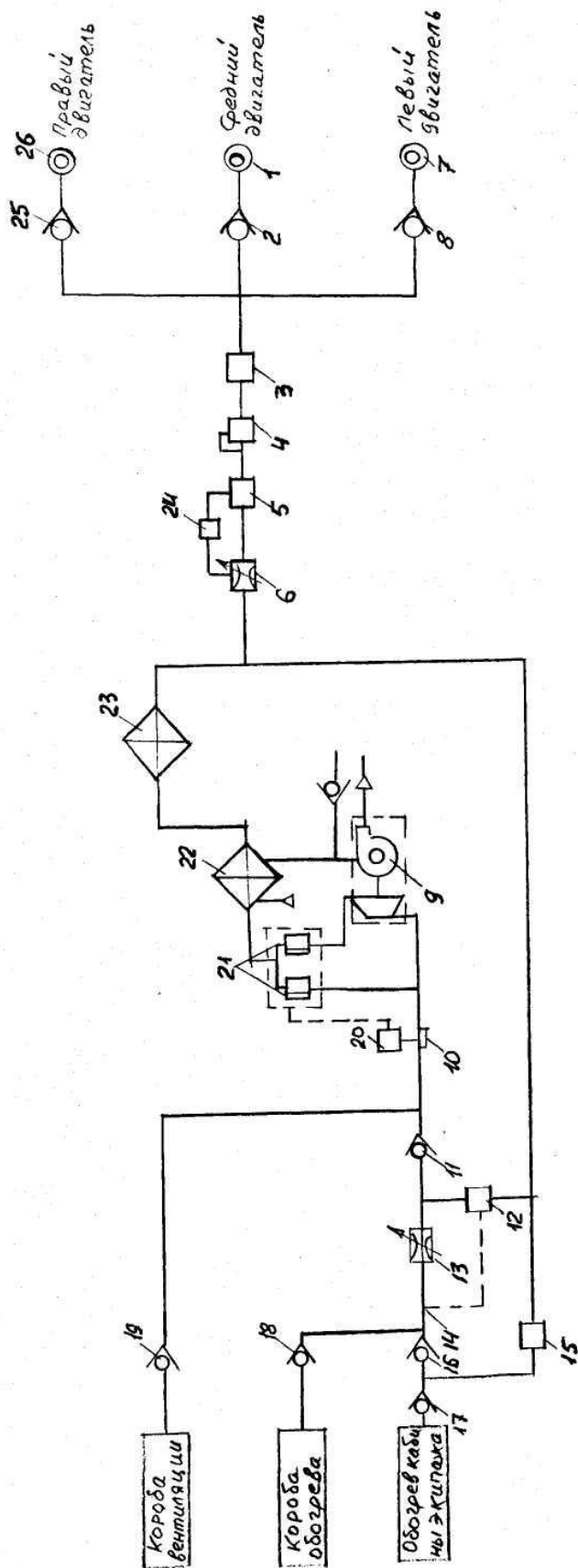


Рис. 2.7.1. Система кондиционирования воздуха самолета Як-40

4. Производится расчет надежности системы; исходной информацией являются вероятности безотказной работы элементов.

Для построения структурной схемы используются последовательные и параллельные цепочки. Последовательные соединения, когда отказ любого элемента приводит к отказу системы; параллельное соединение, когда отказ одного из элементов не приводит к отказу системы.

Графическое изображение последовательных и параллельных звеньев, расчетные формулы для оценки их надежности приведены в табл. 2.7.1.

2.7.2. Последовательность выполнения работы

1. Получение варианта принципиальной схемы сложной системы.
2. Анализ функциональных связей между элементами системы и возможности работы системы при отказе ее элементов.
3. Построение структурной схемы.
4. Расчет вероятности безотказной работы системы кондиционирования воздуха самолета Як-40 для $t = 2$ ч и $t = 300$ ч при условии равнонадежности ее элементов по данным о вероятности безотказной работы изделия в практическом занятии № 6.

2.7.3. Составление отчета по результатам выполнения практического занятия № 7, содержащего:

- наименование практического занятия;
- цель, задачи практического занятия;
- оценка показателей надежности функциональной системы методом структурных схем;
- выводы по практическому занятию № 7.

2.8. Практическое занятие № 8

Тема: Анализ надежности функциональной системы методом логических схем.

Цель: Приобрести навыки оценки надежности функциональных систем методом логических схем.

2.8.1. Необходимые теоретические сведения

Метод логических схем применяется для оценки надежности одно- и многофункциональных систем, позволяет учитывать виды отказов элементов.

Порядок применения метода

1. Анализируется принципиальная схема функциональной системы, определяется функциональная связь между элементами.
2. Строится логическая схема надежности системы, отражающая все возможные варианты безотказной работы элементов для обеспечения безотказной работы системы.
3. Производится расчет надежности системы; исходной информацией являются вероятности безотказной работы элементов и логические связи между ними.

Для построения логической схемы используются логические элементы «и» и «или». Для описания безотказной работы системы при безотказной работе и одного, и другого элемента используется «и», при безотказной работе или одного, или другого элемента – «или».

Пример логической схемы и расчетные формулы для оценки надежности системы представлены в табл. 2.8.1.

Таблица 2.8.1

Расчет надежности функциональной системы методом логических схем

Логическая схема	Условные обозначения	Вероятность безотказной работы	Исходная информация
	<p>A - событие безотказной работы элемента; \bar{A} - событие отказа элемента; и – логический символ умножения; или – логический символ сложения</p>	$P = P_{A_1} P_{A_2} P_{A_3} + P_{A_1} (1 - P_{A_2}) + P_{A_2} (1 - P_{A_3})$	$P_{A_i} = e^{-\lambda_i t},$ $i = 1, 2, 3$ <p>λ_i – интенсивность отказа i-го элемента; t – время работы системы.</p>

2.8.2. Последовательность выполнения работы

1. Анализ принципиальной схемы системы кондиционирования воздуха самолета Як-40 (табл. 2.7.2, рис. 2.7.1).

2. Анализ функциональных связей между элементами системы.

3. Построение логической схемы надежности системы кондиционирования воздуха самолета Як-40.

4. Расчет вероятности безотказной работы системы кондиционирования воздуха самолета Як-40 для $t=2ч$ и $t=300ч$ методом логических схем при условии равнонадежности ее элементов по данным о вероятности безотказной работы изделия по варианту задания в практическом занятии № 6.

5. Сравнение результатов расчетов методом логических схем и методом структурных схем (практическое занятие № 7).

2.8.3. Составление отчета по результатам выполнения практического занятия № 8, содержащего:

- наименование практического занятия;
- цель, задачи практического занятия;
- оценка показателей надежности функциональной системы методом логических схем;
- выводы по практическому занятию № 8.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П. 1

Значения $F_0(x)$

х		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	0,	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
0,2	0,	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,3	0,	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480	6517
0,4	0,	6554	6591	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,5	0,	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190	7224
0,6	0,	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
0,7	0,	7580	7611	7642	7673	7704	7734	7764	7794	7823	7852
0,8	0,	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
0,9	0,	8159	8186	8212	8238	8264	8289	8315	8340	8365	8389
1	0,	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
1,1	0,	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810	8830
1,2	0,	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	9015
1,3	0,9	320	490	658	824	988	1149	1308	1466	1621	1774
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056	3189
1,5	0,9	3319	3448	3574	3699	3822	3943	4062	4179	4295	4408
1,6	0,9	4520	4630	4738	4845	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,7	0,9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246	6327
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
1,9	0,9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7558	7615	7670
2	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124	8169
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537	8574
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870	8899
2,3	0,9	8928	8956	8983	9010	9036	9061	9086	9111	9134	9158
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431	3613
2,5	0,99	3790	3963	4132	4297	4457	4614	4766	4915	5060	5201
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319	6427
2,7	0,99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282	7365
2,8	0,99	7445	7523	7599	7673	7744	7814	7882	7948	8012	8074
2,9	0,99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559	8605
3	0,99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965	8999

Коэффициенты для распределения Вейбулла

b	K_b	C_b	ν
0,2	120	1900	15,83
0,3	8,86	46,9	5,29
0,4	3,32	10,4	3,14
0,5	2,00	4,47	2,24
0,6	1,50	2,61	1,74
0,7	1,27	1,86	1,46
0,8	1,13	1,43	1,26
0,9	1,05	1,17	1,11
1,0	1,00	1,00	1,00
1,1	0,965	0,878	0,910
1,2	0,941	0,787	0,837
1,3	0,924	0,716	0,775
1,4	0,911	0,659	0,723
1,5	0,903	0,612	0,678
1,6	0,897	0,574	0,640
1,7	0,892	0,540	0,605
1,8	0,889	0,512	0,575
1,9	0,887	0,485	0,547
2,0	0,886	0,463	0,523
2,1	0,886	0,441	0,498
2,2	0,886	0,425	0,480
2,3	0,886	0,409	0,461
2,4	0,887	0,394	0,444
2,5	0,887	0,380	0,428
3,0	0,893	0,326	0,365
3,5	0,900	0,285	0,316
4,0	0,906	0,255	0,281

$T_{cp}=a K_b$, $\sigma(t)=a C_b$

Таблица П. 3

Значения χ^2 , соответствующие значениям $P(\chi^2)$
и числам степеней свободы r

r	$P(\chi^2)$										
	0,99	0,95	0,90	0,50	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
1	0,02	0,04	0,02	0,46	1,32	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88	10,8
2	0,02	0,10	0,21	1,39	2,77	4,61	5,99	7,38	9,21	10,6	13,8
3	0,12	0,35	0,58	2,37	4,11	6,25	7,81	9,35	11,3	12,8	16,3
4	0,30	0,71	1,06	3,36	5,39	7,78	9,49	11,1	13,3	14,9	18,5
5	0,55	1,15	1,61	4,35	6,63	9,24	11,1	12,8	15,1	16,7	20,5
6	0,87	1,64	2,20	5,35	7,84	10,6	12,6	14,4	16,8	18,5	22,5
7	1,24	2,17	2,83	6,35	9,04	12,0	14,1	16,0	18,5	20,3	24,3
8	1,65	2,73	3,49	7,34	10,2	13,4	15,5	17,5	20,1	22,0	26,1
9	2,09	3,33	4,17	8,34	11,4	14,7	16,9	19,0	21,7	23,6	27,9
10	2,56	3,94	4,87	9,34	12,5	16,0	18,3	20,5	23,2	25,2	29,6
11	3,05	4,57	5,58	10,3	13,7	17,3	19,7	21,9	24,7	26,8	31,3
12	3,57	5,23	6,30	11,3	14,8	18,5	21,0	23,3	26,2	28,3	32,9
13	4,11	5,89	7,04	12,3	16,0	19,8	22,4	24,7	27,2	29,8	34,5
14	4,66	6,57	7,79	13,3	17,1	21,1	23,7	26,1	29,1	31,3	36,1
15	5,23	7,26	8,55	14,3	18,2	22,3	25,0	27,5	30,6	32,8	37,7
16	5,81	7,96	9,31	15,3	19,4	23,5	26,3	28,8	32,0	34,3	39,3
17	6,41	8,67	10,1	16,3	20,5	24,8	27,6	30,2	33,4	35,7	40,8
18	7,01	9,39	10,9	17,3	21,6	26,0	28,9	31,5	34,8	37,2	42,3
19	7,63	10,1	11,7	18,3	22,7	27,2	30,1	32,9	36,2	38,6	43,8
20	8,26	10,9	12,4	19,3	23,8	28,4	31,4	34,2	37,6	40,0	45,3
21	8,90	11,6	13,2	20,3	24,9	29,6	32,7	35,5	38,9	41,4	46,8
22	9,54	12,3	14,0	21,3	26,0	30,8	33,9	36,8	40,3	42,8	48,3
23	10,2	13,1	14,8	22,3	27,1	32,0	35,2	38,1	41,6	44,2	49,7
24	10,9	13,8	15,7	23,3	28,2	33,2	36,4	39,4	43,0	45,6	51,2
25	11,5	14,6	16,5	24,3	29,3	34,4	37,7	40,6	44,3	46,9	52,6
26	12,2	15,4	17,3	25,3	30,4	35,6	38,9	41,9	45,6	48,3	54,1
27	12,9	16,2	18,1	26,3	31,5	36,7	40,1	43,2	47,0	49,6	55,5
28	13,6	16,9	18,9	27,3	32,6	37,9	41,3	44,5	48,3	51,0	56,9
29	14,3	17,7	19,8	28,3	33,7	39,1	42,6	45,7	49,6	52,3	58,3
30	15,0	18,5	20,6	29,3	34,8	40,3	43,8	47,0	50,9	53,7	59,7

ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и авиадвигателей: учеб. пособие. - М.: МИИГА, 1990.- Ч. I.
2. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и авиадвигателей: учеб. пособие. - М.: МГТУ ГА, 1995. – Ч. 2.
3. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники: пособие по выполнению контрольной работы. – М.: МГТУ ГА, 2006.
4. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники: пособие по выполнению лабораторной работы. – М.: МГТУ ГА, 2011.
5. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. Официальное издание.- М.: Стандартинформ, 2010.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Общие положения.....	3
2	Методические указания по выполнению практических занятий.....	4
2.1	Практическое занятие № 1 Система стандартов «Надежность в технике». Основные термины и определения. Оценка показателей готовности изделий.....	4
2.2	Практическое занятие № 2 Модели надёжности невосстанавливаемых изделий	13
2.3	Практическое занятие № 3 Модели надежности восстанавливаемых изделий.....	24
2.4	Практическое занятие № 4 Непараметрические методы оценки показателей надежности.....	28
2.5	Практическое занятие № 5 Параметрические методы оценки показателей надежности.....	31
2.6	Практическое занятие № 6 Оценка показателей надежности по данным эксплуатационных наблюдений.....	35
2.7	Практическое занятие № 7 Анализ надежности функциональных систем методом структурных схем.....	39
2.8	Практическое занятие № 8 Анализ надежности функциональной системы методом логических схем.....	42
	Приложения.....	44
	Литература.....	48

