

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

А.А. Ицкович, И.А. Файнбург

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ**

Пособие  
по выполнению контрольной работы  
«Оценка показателей надежности  
авиационной техники»

для студентов  
направления 162300  
заочного обучения

**Москва – 2014**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

**Кафедра технической эксплуатации ЛАиАД**

**А.А.Ицкович, И.А.Файнбург**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ**

Пособие  
по выполнению контрольной работы  
«Оценка показателей надежности  
авиационной техники»

для студентов  
направления 162300  
заочного обучения

**Москва 2014**

ББК 052-021.1

И 96

Рецензент канд. техн. наук, доц. Найда В.А.

Ицкович А.А., Файнбург И.А.

Основы теории надежности. Пособие по выполнению контрольной работы «Оценка показателей надежности авиационной техники»: М.: МГТУ ГА, 2014. - 48 с.

Данное пособие издается в соответствии с учебным планом для студентов направления 162300 заочного обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 11.03.2014 г.  
и методического совета 18.11.2014 г.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выполнение контрольной работы (КР) является этапом изучения дисциплины «Основы теории надежности» и предусматривает решение задач по основным разделам дисциплины, модели надежности изделий, показатели надежности изделий, методы оценки показателей надежности по данным испытаний и эксплуатационных наблюдений; методы обеспечения и анализа надежности функциональных систем летательных аппаратов (ЛА).

Целью выполнения КР является овладение научными методами оценки и анализа надежности авиационной техники (АТ), систематизация и обобщение теоретических знаний, приобретенных при изучении материала по дисциплине «Основы теории надежности», получение навыков и умений применять теоретические знания к решению практических задач анализа надежности АТ. При выполнении КР автор несет ответственность за правильность расчетов и принятые решения.

Преподаватель на установочной лекции дает рекомендации по выполнению КР студентом, уточняет объем и глубину проработки отдельных заданий, проводит консультации.

При оформлении КР необходимо соблюдать определенные требования. Изложение материалов КР должно быть конкретным и четким. Заимствованные цитаты, таблицы и другие материалы должны иметь ссылку на источник. В тексте необходимо соблюдать единую техническую терминологию, принятую в учебных пособиях и стандартах.

Оформление материала, изложенного в КР, производится в соответствии с ГОСТ 2.105-95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам,

ГОСТ 2.106-96. ЕСКД. Текстовые документы.

Титульный лист КР должен быть выполнен по форме Приложения 6.

За ним следует «Содержание», на котором выполняется основная надпись.

Текст пояснительной записки должен быть написан разборчиво на одной стороне листа формата А4 (297x210 мм). Числовые значения в формулах объясняются. Окончательный результат приводится с указанием размерности. Таблицы, помещенные в тексте должны иметь номера и названия. При приведении результатов расчетов в табличной (графической) форме даются примеры расчетов с подстановкой исходных данных в расчетные формулы. Графики, схемы, рисунки следует выполнять на листах миллиметровой бумаги формата А4. Рисунки должны иметь номера и подрисуночные подписи. На графиках указывать масштаб и размерность изображаемых величин. На все таблицы и рисунки в тексте должны быть ссылки.

В тексте необходимо выделить заголовки отдельных частей КР, их разделов и подразделов в соответствии с «Содержанием». В конце пояснительной записки приводится литература, используемая при выполнении КР.

## 2. СТРУКТУРА КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

При выполнении КР необходимо решить следующие задачи:

- 1) Анализ данных эксплуатационных наблюдений за отказами изделий системы кондиционирования воздуха (СКВ) парка ЛА.
- 2) Статистический анализ показателей безотказности невосстанавливаемых изделий ЛА параметрическим методом.
- 3) Статистический анализ показателей безотказности невосстанавливаемых изделий ЛА непараметрическим методом.
- 4) Статистический анализ показателей безотказности восстанавливаемых изделий ЛА.
- 5) Расчет показателей надежности функциональной системы ЛА.

Пояснительная записка КР должна включать:

- 1) Титульный лист;
- 2) Техническое задание (№ варианта задания, наименование ФС ЛА, принципиальная схема ФС ЛА, формулировка задач, исходные данные, ограничения и допущения);
- 3) Основную часть, включающую решение поставленных задач: краткое описание устройства и принципа работы ФС ЛА, применяемые термины и определения, последовательное изложение материалов по решению задач согласно техническому заданию, а именно: расчеты, построенные графики, пояснения к ним. При приведении результатов расчетов в табличной (графической) форме даются примеры расчетов с подстановкой исходных данных в расчетные формулы;
- 4) Выводы по результатам решения задач выполненной работы;
- 5) Список использованной литературы.

## 3. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

В качестве объектов в задачах анализа безотказности изделий функциональной системы ЛА выбираются по № варианта задания типовые изделия систем кондиционирования воздуха (СКВ) самолетов Ил-62, Ту-154, Як-40: заслонки, воздухо-воздушные радиаторы, турбохолодильники, обратные клапаны, регуляторы избыточного давления, фильтры, регуляторы подачи воздуха.

Исходные данные для выполнения КР приведены в приложениях 1, 2. Выбор варианта задания производится согласно шифру зачетной книжки по сумме двух последних цифр (табл. П.1.1 приложения 1). Например, для шифра М73576, вариант 13 (7+6).

Исходными данными по вариантам заданий (приложение 1):

для решения задач 1-4 являются результаты эксплуатационных наблюдений за отказами изделий СКВ: наработки до отказа (табл.П.2.1-2.6 приложения 2) и наработки до цензурирования (табл.П.2.7 приложения 2.1);

для решения задачи 5 используются принципиальные схемы СКВ (приложение 2.2).

Задание состоит из следующих задач.

1) Анализ данных эксплуатационных наблюдений за отказами изделий СКВ парка ЛА.

2) Статистический анализ показателей безотказности невосстанавливаемых изделий ЛА параметрическим методом.

3) Статистический анализ показателей безотказности невосстанавливаемых изделий ЛА непараметрическим методом.

4) Статистический анализ показателей безотказности восстанавливаемых изделий ЛА.

5) Расчет показателей надежности функциональной системы ЛА.

При решении каждой задачи должны быть выполнены следующие операции.

#### Задача № 1

1.1) Определение вида случайных величин наработки изделий (реализаций): наработки до отказа («полные реализации») и наработки до цензурирования («неполные реализации»).

1.2) Определение понятий: однократно цензурированные и многократно цензурированные выборки.

1.3) Построение ранжированных временных диаграмм (аналогов вариационных рядов) наработок до отказа  $\tau_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  и наработок до цензурирования  $t_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ .

1.4). Выбор размаха и числа интервалов временных диаграмм.

#### Задача № 2

2.1) Классификация и выбор методов оценки показателей безотказности изделий.

2.2) Оценка показателей безотказности параметрическим методом для однократно цензурированной выборки.

а) оценка и построение гистограмм статистической плотности распределения  $f^*(t)$  и статистической интенсивности отказов  $\lambda^*(t)$ ;

б) формирование гипотезы о законе распределения для однократно цензурированной выборки;

в) оценка параметров распределения для однократно цензурированной выборки:  $\lambda^*$ ;  $a^*$  и  $b^*$ ;  $\lambda$ ;  $m^*t = T^*cp$  и  $\sigma^*t$ ;

г) проверка гипотезы о законе распределения для однократно цензурированной выборки;

д) оценка показателей безотказности для принятого закона распределения наработки до отказа.

#### Задача № 3

3.1). Оценка показателей безотказности по полным данным.

а) определить число невосстанавливаемых изделий  $N$  и число отказавших изделий  $n$ . Найти доверительные границы для вероятности безотказной работы  $R_n$  и  $R_v$  при двухсторонней доверительной вероятности  $\alpha=0,95$ ;

б) обосновать необходимость определения доверительного интервала (нижнюю  $P_n$  и верхнюю  $P_v$  границы) для доверительной вероятности  $\alpha$ .

3.2) Оценка показателей безотказности по многократно цензурированным выборкам:  $P(t)$ ,  $T_{cp}$ ,  $T_\gamma$ .

а) определить точечные оценки вероятности безотказной работы за время непрерывного беспосадочного полета самолета  $t_1 = 3 \div$  и за период наработки до профилактики  $t_2 = 300 \div$ ;

б) вычислить гамма-процентную наработку  $T_\gamma$  при  $\gamma=85\%$ .

#### Задача № 4

4.1) Построение временной диаграммы однопоточных восстанавливаемых изделий:  $N = N_c \cdot k$ , где  $N_c$  — число самолетов,  $k$  — число изделий на самолете, выбор числа интервалов и разбивка временной диаграммы на интервалы.

4.2) Статистическая оценка параметра потока отказов  $\omega(t)$ , построение гистограммы, выравнивание методом наименьших квадратов и определение вероятности безотказной работы восстанавливаемых изделий за интервал наработки до  $i$ -й формы периодического технического обслуживания ЛА  $t_2 = 300 \div$ ,  $t_3 = 900 \div$ .

#### Задача № 5

5.1) Анализ функциональной системы.

а) по описанию и принципиальной схеме функциональной системы изучение принципа построения системы, рабочих функций изделий и взаимосвязи между ними;

б) определение условий обеспечения работоспособности системы с учетом состояния ее элементов;

в) определение вероятностей безотказной работы изделий.

5.2) Расчет показателей надежности функциональной системы методом структурных схем.

а) построение структурной схемы функциональной системы для расчета показателей надежности на основе условий безотказной работы системы;

б) составление выражения для расчета вероятности безотказной работы функциональной системы;

в) расчет вероятности безотказной работы функциональной системы по известным значениям вероятностей безотказной работы изделий.

5.3) Расчет показателей надежности функциональной системы методом логических схем.

а) составление алгебраического уравнения событий безотказной работы функциональной системы;

б) построение логической схемы функциональной системы для расчета показателей надежности на основе условий безотказной работы системы;

в) составление выражения для расчета вероятности безотказной работы функциональной системы;

г) расчет вероятности безотказной работы функциональной системы по известным значениям вероятностей безотказной работы изделий;

д) анализ надежности ФС на соответствие требованиям по уровню надежности при эксплуатации.

#### 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

4.1. Анализ данных эксплуатационных наблюдений за отказами изделий СКВ самолетов

1). Исходные данные (табл. П. 2.1-П. 2.7 приложения 2.1) анализируются в соответствии с заданиями своего варианта (приложение 1). При этом статистические данные содержат два типа случайных величин (реализаций): наработки изделий, составляющих выборки:

а) реализации, представляющие собой случайные величины наработок до отказа (между отказами)  $t_1, \dots, t_i, \dots, t_n$ ,  $i = \overline{1, n}$  (табл. П. 2.1-П. 2.6 приложения 2.1). Назовем их «полными реализациями»;

б) реализации, представляющие собой величины наработок изделий до цензурирования  $\tau_1, \dots, \tau_j, \dots, \tau_m$ ,  $j = \overline{1, m}$  (табл. П. 2.7 приложения 2.1). Это соответствует случаю, когда испытания (наблюдения) прекращены или объект снят с испытаний до наступления отказа. Назовем их «неполными реализациями».

2). В первом случае используется полная выборка. Во втором случае имеет место цензурирование — событие, приводящее к прекращению эксплуатационных наблюдений изделий до наступления отказа (предельного состояния).

При формировании выборки изделий во втором случае образуется цензурированная выборка, элементами которой являются значения наработок до отказа (полные реализации) и наработок до цензурирования (неполные реализации).

Различаются однократно и многократно цензурированные выборки. В однократно цензурированной выборке значения всех наработок до цензурирования равны между собой и меньше наибольшей наработки до отказа Многократно цензурированная выборка характеризуется значениями наработок до цензурирования, не равными между собой.

3). В качестве аналога вариационного ряда рекомендуется использовать ранжированную временную диаграмму, в которой реализации расположены в следующем порядке: сначала полные реализации в порядке возрастания, затем неполные реализации в порядке убывания. Построение ранжированных временных диаграмм для однократно цензурированной выборки (рис. П. 3.1, приложения 3) производится по данным табл. П. 2.1 - П. 2.6 приложения 2.1, а для многократно цензурированной (рис. П.3.2 приложения 3) — по данным табл. П. 2.1 – П. 2.7 приложения 2.1.

4). На построенных ранжированных временных диаграммах (рис. П.3.1, П.3.2) производится группировка результатов наблюдений путем разбиения всего периода наблюдений (размаха), содержавшего  $n$  полных реализаций  $x_i$ ,  $x_1, \dots, x_n$  на  $L$  равных или неравных интервалов  $\Delta t_k$ , но только не пустых. Для этого проводятся два крайних сечения ранжированной диаграммы, первое — через точку, соответствующую окончанию наименьшей из полных реализаций (или левее этой



точки), вторую — через точку, соответствующую окончанию наибольшей из реализаций (или правее этой точки).

Расстояние между крайними сечениями определяет размах  $v$ , полученное значение которого разбивается на  $L$  интервалов и проводятся сечения диаграммы, соответствующие границам интервалов.

4.2. Статистический анализ надежности невосстанавливаемых изделий СКВ самолета параметрическим методом.

1) Анализ методов оценки показателей надежности изделий.

Параметрический метод оценки показателей надежности предусматривает при известном законе распределения наработки до отказа и других случайных величин выполнение следующих операций: оценку параметров закона распределения, входящих в расчетную формулу определенного показателя надежности, и оценку показателей надежности по вычисленным оценкам параметров закона распределения. При неизвестном законе распределения определяется сначала закон распределения.

Непараметрический метод предусматривает при неизвестном законе распределения наработки до отказа выполнение непосредственной оценки показателей надежности по данным эксплуатационных наблюдений.

Оценка показателей надежности изделий производится по результатам ограниченного количества наблюдений (выборки), представляющих некоторую часть генеральной совокупности. Под генеральной совокупностью подразумеваются результаты наблюдений по всем изделиям всего парка самолетов данного

статистического оценивания необходимо, чтобы выборка была представительна, т.е. достаточно полно отражала свойства генеральной совокупности типа.

Показатель надежности  $\theta^*$ , определенный по результатам наблюдений за выборкой, является статистической оценкой показателя надежности  $\theta$ . Для оценки показателей надежности применяют точечные и интервальные оценки.

Для. Критерием качества точечной оценки служат: несмещенность —  $M[\theta^*]=\theta$ ; эффективность —  $M[(\theta^*-\theta)^2]_{\min}$ ; состоятельность —  $\lim P(|\theta^*-\theta|<\epsilon)=1$ , где

$M[\theta^*]$  — математическое ожидание  $\theta^*$ ,  $n$  — объем выборки.

2) Задача оценки показателей безотказности параметрическим методом заключается в следующем. По данным наблюдений известны наработки  $t_1, \tau_1, \dots, t_n, \tau_n, (N-n) \cdot T$ , где  $T > \tau$ , т.е. для  $N - n$  изделий наработка до отказа будет больше некоторого значения  $T$ , определяющего период эксплуатационных наблюдений. Данная совокупность статистических данных характеризуется переменностью парка изделий в различных интервалах наработки и усеченностью выборки.

Рекомендуется следующий порядок решения задачи:

1) построение ранжированной временной диаграммы для однократно цензурированной выборки (рис. П.3.1, приложения 3);

2) построение гистограмм плотности вероятности наработки до отказа  $f^*(t)$ , и интенсивности отказов  $\lambda^*(t)$  (рис. П.3.2, приложения 3);

- 3) формирование гипотезы о законе распределения наработки до отказа с учетом характера теоретических зависимостей  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  (рис. П.3.3, приложения 3);
- 4) оценка параметров распределения наработки до отказа;
- 5) проверка гипотезы о законе распределения наработки до отказа по критерию  $\chi^2$ ;
- б) оценка показателей надежности.

Оценка статистической плотности распределения  $f^*(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda^*(t)$  производится для каждого интервала  $\Delta t_i$  по формулам:

$$f_i^*(t) = \frac{\Delta n}{N_i \cdot \Delta t}, \quad (4.1)$$

$$\lambda_i^*(t) \equiv \frac{\Delta n}{[N_i - n(t)] \cdot \Delta t}, \quad (4.2)$$

где:  $\Delta n_i$ —число отказавших изделий в интервале  $\Delta t_i$ ;

$N_i$  — число изделий, наблюдаемых в интервале  $\Delta t_i$ ;

$n_i(t)$  — число отказавших изделий до начала  $i$ -го интервала.

Число  $N_i$  для  $i$ -го интервала определяется как общее число всех реализаций диаграммы за исключением тех неполных реализаций, которые по величине меньше левой границы этого интервала, т.е. по формуле

$$N_i = N - \sum_{i=1}^{i-1} m_i \cdot$$

Результаты расчетов по (4.1, 4.2) представляются в виде таблиц и гистограмм  $f^*(t)$  и  $\lambda^*(t)$  (рис.П.3.2 приложения 3).

Формирование гипотезы о законе распределения наработки до отказа должно основываться на анализе физики отказов и сравнительном анализе гистограмм  $f^*(t)$  и  $\lambda^*(t)$  с теоретическими кривыми  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  по их виду для различных законов распределения (рис.П.3.4, приложения 3).

Оценка параметров распределения для однократно цензурированной выборки выполняется методом максимального правдоподобия.

Метод максимального правдоподобия состоит в следующем: строится функция правдоподобия  $L(\tau, \theta)$ , зависящая от результатов наблюдений выборки из  $N$  изделий  $\tau_1, \dots, \tau_n$ ,  $(N-n) \cdot T$  и параметра  $\theta$  неизвестного закона распределения наработки до отказа  $F(\tau, \theta)$ . Задача метода — найти оценку  $\theta^*$ . Оценка будет достаточной, если предположить, что при этом ее значении вероятность наблюдаемого результата максимальна  $P\{\tau, \theta\} \rightarrow \max$ .

Для нахождения максимума строится функция правдоподобия, учитывающая все наблюдения  $L(\tau, \theta) = \prod P\{\tau, \theta\}$ , и определяется  $\max$  этой функции из условия  $\partial L(\tau, \theta) / \partial \theta = 0$  и соответствующее этому максимуму значение параметра  $\theta^*$ .

Для случая усеченной выборки при экспоненциальном законе распределения наработки до отказа функция плотности распределения запишется:

$$f(t) = \lambda^* e^{-\lambda \cdot t_i} = \frac{1}{T_{cp}} e^{-t_i/T_{cp}},$$

где:  $T_{cp}$  — средняя наработка до отказа,  $\lambda^* = \frac{1}{T_{\bar{n}\bar{d}}}$ .

Для периода наблюдения  $T$  функция правдоподобия будет иметь вид:

$$L^T = \sum_{i=1}^n \ln(1/T_{cp} \cdot e^{-t_i/T_{cp}}) - (N-n) \cdot T/T_{cp}.$$

Отсюда находим среднюю наработку до отказа  $T_{cp}$

$$\frac{\partial L(T)}{\partial L(T_{cp})} = \frac{n}{T_{cp}} + \frac{1}{T_{cp}^2} \sum_{i=1}^n t_i + \frac{N-n}{T_{cp}^2} \cdot T_{cp},$$

тогда

$$T_{\bar{n}\bar{d}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{i\bar{n}} \cdot \Delta n_i + \frac{N-n}{n} \cdot T, \quad (4.3)$$

где:  $t_{i\bar{n}}$  - средняя наработка до отказа  $i$ -го интервала;

$$t_{i\bar{n}} = \frac{t_i^1 + t_i^{11}}{2}, \quad t_i^1 \text{ и } t_i^{11} - \text{левая и правая границы } i\text{-го интервала};$$

$\Delta n_i$  - число отказавших элементов в  $i$ -м интервале;

$N$  - число наблюдаемых изделий;

$n$  - число отказавших элементов за период наблюдения;

$T$  - период наблюдения.

Функции и параметры распределений (экспоненциального, нормального и Вейбулла) приведены в табл. 4. 1.

Оценка параметров распределения по формулам приведенным в табл. 4. 1:

- 1) оценка параметра экспоненциального распределения  $\lambda$ ;
- 2) оценка параметров нормального распределения  $m_t$  и  $\sigma_t$ ;
- 3) оценка параметров распределения Вейбулла  $a$  и  $b$

- расчет коэффициента вариации  $\nu = \frac{\sigma_t}{m_t}$ ,

- определение параметра распределения  $b$  и коэффициента  $K_b$  по табл. П.5.3 приложения 5,

- расчет параметра распределения  $a = \frac{m_t^*}{K_b}$ ;

Проверка гипотезы о законе распределения для однократно цензурированной выборки может выполняться по критерию Пирсона  $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^L \frac{(\Delta n_i - NP_i)^2}{NP_i}, \quad (4.4)$$

где:  $L$  — число интервалов группирования;

$\Delta n_i$  — число наблюдаемых статистических данных, попавших в  $i$ -й интервал;

$NP_i$  — среднее число данных, попавших в  $i$ -й интервал при условии, что гипотеза о законе распределения верна,  $P_i = F(t_i) - F(t_{i-1})$ .

Большое значение критерия  $\chi^2$  указывает на расхождение между гипотезой и статистическими данными. Поэтому критической областью является интервал

$\{ \chi^2_{1-0.01\alpha, \infty} \}$ , где  $\alpha$  — принятый уровень значимости в %. Уровень значимости — это выраженная в процентах максимально допустимая вероятность неправильного отвержения гипотезы (ошибка первого рода). Наиболее употребительные уровни значимости — 1; 5; 10%.  $\chi^2_{1-0.01\alpha, S}$  — квантиль  $\chi^2$  распределения с  $L-1-S$  степенями свободы, отвечающий вероятности  $1-0.01\alpha$ , где  $S$  — число наложенных связей, зависящих от числа параметров предполагаемого закона распределения наработки до отказа. Значения квантилей приведены в табл. П.5.4 приложения 5. Входами в таблицу являются число степеней свободы  $L-1-S$  и вероятность  $1-0.01\alpha$ . Если расчетное значение критерия  $\chi^2_{\text{расч.}}$  попадет в критическую область, т.е.  $\chi^2_{\text{расч.}} \geq \chi^2_{1-0.01\alpha, S}$ , то гипотеза отвергается, в противном случае — принимается.

Знание закона распределения и его параметров позволяет определить показатели надежности изделий.

Таблица 4. 1

Функции и параметры распределения наработки до отказа изделий

Закон распределения	Функция распределения $F(t)$	Параметры распределения
Экспоненциальный	$1 - e^{-\lambda t_0}$	$\lambda = \frac{1}{T_{\bar{n}d}}$
Нормальный	$\Phi\left(\frac{\tau_0 - m_t}{\sigma_t}\right)$ по табл. 5.1 приложения 5	$m_t = T_{\bar{n}d}$ $\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{T}_{\bar{n}d})^2}$
Вейбулла	$1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$	$v = \frac{\sigma_t}{m_t}$ , $b = f(v)$ , $a = \frac{m_t}{K_b}$ , где $b$ и $K_b$ по табл. 5.3 приложения 5

4.3. Учитывая особенности данных эксплуатационных наблюдений, целесообразно рассмотреть оценку показателей надежности непараметрическим методом отдельно по полным данным и цензурированным выборкам.

1) Задача оценки показателей надежности по полным данным формулируется следующим образом. Если под наблюдением находится  $N$  однотипных изделий с неизвестной, но одинаковой вероятностью отказа  $q(t)$ , то за фиксированную наработку  $T$  число отказавших изделий  $r$  является случайной величиной, имеющей биномиальное распределение

$$P\{r=n\} = C_N^n q^n (1-q)^{N-n}. \quad (4.5)$$

Требуется найти оценку вероятности безотказной работы  $P=1-q$ . Оценка вероятности отказа  $q$  может быть получена методом максимального правдоподобия. Функция правдоподобия, полученная из (4.5), зависит от значений  $N$  и  $n$

$$L(q) = C_N^n q^n (1-q)^{N-n}.$$

В интервале  $0 < q < 1$  при любом виде функции  $L(q)$  имеет максимум. Функцию правдоподобия сначала логарифмируют

$$\lg L(q) = \lg C_N^n + n \lg(q) + (N-n) \lg(1-q),$$

затем дифференцируют

$$\frac{\partial \ln L}{\partial q} = \frac{n}{q} = \frac{N-n}{1-q}.$$

Откуда находится точечная оценка для вероятности отказа при наработке  $T$

$$q^* = n/N \quad (4.6)$$

и точечная оценка вероятности безотказной работы при наработке  $T$

$$P^* = 1 - n/N. \quad (4.7)$$

Любая точечная оценка, если даже она удовлетворяет всем критериям качества, обладает существенным недостатком, представляя собой лишь частное значение случайной величины. Поэтому, кроме точечной оценки, желательно знать "надежные" границы, так называемые доверительный интервал и доверительную вероятность.

Задача заключается в том, чтобы по выборочным характеристикам случайной величины  $q^*$  определить нижнюю  $q_n$  и верхнюю  $q_v$  доверительные границы генеральной характеристики  $q$ . Эти границы и определяют интервал, который с некоторой доверительной вероятностью накрывает  $q$ , рис. П. 2.6 приложения 2

$$\alpha^* = P\{q_n \leq q \leq q_v\}. \quad (4.8)$$

Величина  $\alpha^*$  называется двухсторонней доверительной вероятностью. Односторонние доверительные вероятности  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  входят в условия

$$\alpha_1 = P\{q \geq q_n\}, \quad (4.9)$$

$$\alpha_2 = P\{q \leq q_v\}. \quad (4.10)$$

Тогда из (4.8 - 4.10.) получим соотношение

$$\alpha^* = \alpha_1 + \alpha_2 - 1. \quad (4.11)$$

В частном случае, когда  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ , уравнение (4.11) записывается в таком виде

$$\alpha^* = 2\alpha - 1.$$

Величина (ширина) доверительного интервала характеризует точность выборочной оценки генеральной характеристики, а доверительная вероятность — достоверность оценки.

Выражение для оценки имеет вид  $q^*=n/N$ , где  $N$  — фиксированная неслучайная величина, а  $n$  — случайная величина. Поэтому можно утверждать, что независимо от вида функции распределения наработки на отказ оценка для вероятности отказа  $q^*$  имеет также биномиальное распределение.

Учитывая это, границы доверительного интервала могут быть определены из уравнений:

$$1 - \alpha_1 = \sum_{i=n}^N C_i^N q_H^i (1 - q_H)^{N-i},$$

$$1 - \alpha_2 = \sum_{i=0}^n C_i^N q_B^i (1 - q_B)^{N-i}.$$

Введем коэффициенты  $R_0, R_1, R_2$ , приведенные в табл. П.5.5, П.5.6, П.5.7 приложения 5, по которым доверительные границы для вероятности  $q$  вычисляются по следующим формулам:

$$\text{при } n = 0, q_H=0, q_B=R_0/N, \quad (4.12)$$

$$\text{при } n \neq 0, q_H=n/N R_1, q_B=n/N R_2. \quad (4.13)$$

Коэффициенты  $R_0, R_1, R_2$  определяются по формулам:

$$R_0 = N \left[ 1 - \sqrt[n]{1 - \alpha} \right],$$

$$R_1 = \frac{n(2N - n + \frac{1}{2} \chi_{1-\alpha})}{N \chi_{1-\alpha}},$$

$$R_2 = \frac{n(2N - n + \frac{1}{2} \chi_{\alpha})}{N \chi_{\alpha}},$$

где:  $\chi_{1-\alpha}$  — квантиль распределения  $\chi^2$  с  $k=2n$  степенями свободы;

$\chi_{\alpha}$  — квантиль распределения  $\chi^2$  с  $k=2(n+1)$  степенями свободы.

Оценка доверительных границ вероятности безотказной работы определяется следующим образом

$$P_H = 1 - q_B, \quad P_B = 1 - q_H.$$

Примеры оценок показателей безотказности по полным данным непараметрическим методом приведены в приложении 4 (примеры П.4.1, П.4.2).

Оценки, определяемые выражениями (4.6), (4.7) являются эффективными и несмещенными.

2) Задача оценки показателей надежности непараметрическим методом по многократно цензурированным выборкам включает точечную оценку показателей при количестве отказов  $n > 5$ . При  $n < 5$  следует использовать нижние доверительные границы.

Метод позволяет определить точечные оценки вероятности безотказной работы за заданную наработку, среднюю и гамма-процентную наработку до отказа. Порядок определения перечисленных показателей следующий.

По выстроенному в порядке возрастания наработок до отказа  $\tau_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) и в порядке убывания наработок до цензурирования  $t_j$  ( $j=1, \dots, m$ ) вариационному ряду, представленному на рис. П.3.4 приложения 3 в виде ранжированной временной диаграммы, определяется количество интервалов наблюдения  $L: (0, \tau_1), (\tau_1, \tau_2), \dots, (\tau_{l-1}, \tau_l), \dots, (\tau_{L-1}, \tau_L)$ .

Для каждого интервала наблюдений  $l=1, L$  подсчитывают число наработок до отказа  $\sum_{i=1}^l i = n_l$  и число наработок до цензурирования  $\sum_{j=0}^{l-1} j = m_{l-1}$ , лежащих между  $L-1$  и  $L$  интервалами наблюдений.

Совокупность этих значений должна удовлетворять условиям

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^l i = \sum_{l=1}^L n_l = n, \quad \sum_{l=2}^L \sum_{j=0}^{l-1} j = \sum_{i=2}^L n_{i-1} = m.$$

Общее число наблюдаемых изделий  $N=n+m$ . Если вариационный ряд начинается с наработки до отказа, то  $m_0=0$ , а если он заканчивается наработкой до отказа, то  $m_L=0$ .

Вычисляют величину эквивалентного объема цензурированной выборки в каждом интервале наблюдений ( $l=1, \dots, L-1$ )

$$N_{\mathcal{E}l+1} = N_{\mathcal{E}l} \left[ 1 - \frac{m_l}{N - m_l - n_l} \right],$$

где:  $N_{\mathcal{E}1}=N-m_0$ .

Затем вычисляют эмпирическую функцию распределения, соответствующую каждой наработке до отказа в исходном вариационном ряду:

если  $i$ -я наработка до отказа принадлежит первому интервалу наблюдений, то

$$F_1^* = \frac{1 - m_0}{N_{\mathcal{E}1}} \quad (4.14)$$

если  $i$ -я наработка до отказа принадлежит  $l$ -му ( $l=2, L$ ) интервалу наблюдений, то

$$F_l^*(t_i) = \sum_{i=1}^{l-1} \frac{i}{N_{\mathcal{E}(l-1)}} + \frac{I - \sum_{j=0}^{l-1} j - \sum_{i=1}^{l-1} i}{N_{\mathcal{E}l}} \cdot \quad (4.15)$$

Расчет  $F^*(t_i)$  удобно вести в табличной форме с шагом  $i=1$  до  $n$ .

Точечная оценка вероятности безотказной работы за заданную наработку  $t_3$  при условии, что она меньше максимального наблюдаемого значения наработки до отказа  $T$  в вариационном ряду ( $t_3 < \tau_{(N-m_L)}$ ), вычисляется по формуле

$$P^*(t_3) = 1 - [d_i F^*(t_i) + (1-d_i) F^*(t_{i-1})],$$

где

$$d_i = (t_3 - \tau_{i-1}) / (\tau_i - \tau_{i-1}),$$

$\tau_i, \tau_{i-1}$  — наработки до отказа, между которыми лежит наработка  $t_3$ . Точечную оценку средней наработки до отказа вычисляют по формуле:

$$T^* = \sum_{i=1}^L \frac{\sum_{l=v_i+1}^{\mathcal{G}_l} \tau_l}{N_{\mathcal{G}_l}} + [1 - F^*(t_{N-m_L})],$$

$$v_l = m_0 + n_{l-1} + m_{l-1} = m_0 + \sum_{i=1}^{l-1} i + \sum_{j=0}^{l-1} j,$$

где

$$\mathcal{G}_l = v_l + n_l = m_0 + n_{l-1} + m_{l-1} + n_l.$$

Точечную оценку гамма-процентной наработки до отказа  $T^*_\gamma$  вычисляют по формуле:

$$\dots \dots T^*_\gamma = (1-d_2) \tau_{i-1} + d_2 \tau_i,$$

где:  $\tau_{i-1}, \tau_i$  — наработки до отказа, для которых выполняется условие:

$$F^*(t_{i-1}) < 1 - \gamma/100 < F^*(t_i),$$

а  $d_2$  вычисляют по формуле:

$$\dots \dots d_2 = \frac{\frac{100 - \gamma}{100} - F^*(t_{i-1})}{F^*(t_i) - F^*(t_{i-1})}.$$

Если выполнено одно из условий

$$\dots \dots 1 - \gamma/100 = F^*(t_{i-1}) \text{ или } 1 - \gamma/100 = F^*(t_i),$$

то  $T^*_\gamma = \tau_{i-1}$  или соответственно  $T^*_\gamma = \tau_i$ .

Приближенные значения доверительных границ вероятности безотказной работы для доверительной вероятности  $\alpha$  вычисляют по формулам:

$$P_H(t) = P^*(t_3) - U_\beta \sigma_i,$$

$$P_B(t) = P^*(t_3) + U_\beta \sigma_i,$$

$$\sigma_i = [1 - F^*(t_{i-1})] \sqrt{\frac{I - \mathcal{G}}{(N - v_l)(N - \mathcal{G}_l)}},$$

где  $U_\beta$  — квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности  $\beta$ ,

$$\beta = \begin{cases} \alpha & \text{— при вычислении односторонней доверительной границы} \\ \frac{1-\alpha}{2} & \text{— при вычислении двухсторонней доверительной границы} \end{cases}.$$



Пример определения оценок показателей надежности невосстанавливаемых изделий непараметрическим методом по цензурированным данным приведен в приложении 4 (пример П. 4.3).

4.4. Статистический анализ восстанавливаемых изделий проводится на основе оценки показателей безотказности и инженерного анализа физики отказов. На основе данных эксплуатационных наблюдений (своего варианта) строится временная диаграмма для всех самолетов (системы СКВ) рассматриваемого парка (рис.П. 4.2 приложения 4). Причем очень важно, чтобы для каждого изделия  $I = 1, \dots, N$  была определена наработка до рассматриваемого момента  $T$ , независимо от того, были или нет отказы этого изделия. На временной диаграмме отмечаются моменты отказов в масштабе наработки по табл. П.2.1 – П.2.6 приложения 2.1 и моменты восстановлений, которые совпадают с моментами отказов, так как в данной задаче рассматриваем мгновенное восстановление  $t_b=0$ , а также наработки до цензурирования по табл.П.2.7 приложения 2.1. В зависимости от количества отказов проводится выбор величины и числа интервалов наработки (рекомендуется не делать интервалы без отказов). Затем временная диаграмма разбивается на интервалы (рис. П.4.2 приложения 4). По интервалам производится расчет статистической оценки параметра потока отказов  $\omega^*(t)$  по формуле:

$$\omega_i^*(t) = \Delta n_i / (N_i \Delta t_i),$$

где:  $\Delta n_i$  — число отказавших изделий в  $i$ -м интервале;

$N_i$  -число наблюдаемых изделий в  $i$ -м интервале.

С учетом переменного парка  $N_i$  определяется как общее число всех реализаций на диаграмме (рис. П.4.2 приложения 4) за исключением неполных реализаций меньших по величине левой границы  $i$ -го интервала, т.е. границы  $i$ . Результаты расчетов  $\omega_i^*(t)$  сводятся в табл. 4.2 и представляются в виде гистограммы.

По гистограмме  $\omega_i^*(t)$  определяется величина  $\omega(t)$  путем выравнивания методом наименьших квадратов. Обычно ограничиваются линейной зависимостью параметра потока отказов по наработке

$$\omega(t) = \alpha + \beta t,$$

где

$$\alpha_H = \sum_{i=1}^L \gamma_i \omega_i^* - \beta_H \sum_{i=1}^L \gamma_i t_{icc},$$

$$\beta_H = \frac{\sum_{i=1}^L \gamma_i t_{icc} \omega_i^* - (\sum_{i=1}^L \gamma_i \omega_i^*) (\sum_{i=1}^L \gamma_i t_{icc})}{\sum_{i=1}^L \gamma_i (t_{icc})^2 - (\sum_{i=1}^L \gamma_i t_{icc})^2},$$

$L$ -количество интервалов гистограммы,

$t_{icc} = (t_i^1 + t_i^{11}) / 2$  - середина  $i$ -го интервала,  $\gamma_i$ - "вес"  $i$ -го наблюдения

$\sum_{i=1}^L \gamma_i = 1,0$ . При всех равноточных наблюдениях принимается  $\gamma_i = 1/L$ .

По величине параметра потока отказов определяется вероятность безотказной работы за интервал наработки ( $t_0, t$ ), который для восстанавливаемых изделий обычно равен периодичности технического обслуживания изделий —  $t_{np1}=300$ ч и  $t_{np2}=900$  ч

$$P(t_{np}) = e^{-(\alpha + \frac{\beta}{2} t_{np}) t_{np}}$$

проводится расчет и строится график вероятности безотказной работы  $P(t_{np})$  для восстанавливаемых изделий (рис. П.4.3 приложения 4).

Таблица 4.2

Параметр потока отказов  $\omega_i^*(t)$ 

Основные параметры	Интервалы						
	1	2	3	...	i	...	L
	$t_0 - t_1$	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$	...	$t_{i-1} - t_i$	...	$t_{L-1} - t_L$
$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	...	$\Delta t_i$	...	$\Delta t_L$
$N_i$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	..	$N_i$	..	$N_L$
$\Delta n_i$	$\Delta n_1$	$\Delta n_2$	$\Delta n_3$	..	$\Delta n_i$	..	$\Delta n_L$
$\omega_i^*(t)$	$\omega_1^*(t)$	$\omega_2^*(t)$	$\omega_3^*(t)$	..	$\omega_i^*(t)$	..	$\omega_L^*(t)$

#### 4.5. Расчет показателей надежности функциональной системы ЛА

Расчет показателей надежности состоит в определении вероятности безотказной работы СКВ самолетов Ил-62, Ту-154, Як-40  $P(t=2$ ч) и  $P(t=300$ ч).

Расчет выполнить двумя методами: методом структурных схем и методом логических схем. Полученные независимые результаты расчетов должны совпадать.

Описание построения структурной и логической схемы, а также методика расчета по [2, 3].

Исходными данными для расчета служат (приложение 2.2):

1) описание работы принципиальной схемы СКВ самолетов Ил-62, Ту-154, Як-40;

2) перечень изделий, входящих в СКВ самолетов Ил-62, Ту-154, Як-40; вероятности безотказной работы каждого изделия СКВ самолетов Ил-62, Ту-154, Як-40 для  $t=2$ ч и для  $t=300$ ч в соответствии с техническим заданием на КР.

Результаты расчетов представить по форме табл.4.3.

Таблица 4.3

Результаты расчетов показателей надежности системы кондиционирования воздуха самолета (тип самолета)

Метод расчета	Вероятность безотказной работы	
	$t=2$ ч	$t=300$ ч
Структурных схем		
Логических схем		

Анализ надежности СКВ самолетов Ил-62, Ту-154, Як-40 на соответствие требованиям надежности при эксплуатации проводится сравнением расчетных значений показателей надежности системы в целом  $P(t = 2ч)$  и  $P(t = 300ч)$  и изделий  $P_v(t_{зад})$  и  $T_{р\ ср}$  с нормативными значениями этих показателей. Анализ следует проводить по алгоритму (рис. П.4.4) для полученных расчетных значений показателей надежности. В выводах необходимо отметить, соответствует или нет рассматриваемая в КР СКВ и ее изделие требованиям надежности при эксплуатации, и в случае не соответствия предложить способы повышения надежности [2, 3]:

для обеспечения требований по безопасности полетов необходимы конструктивные доработки изделий с целью повышения их надежности или изменение принципиальной схемы ФС (использование резервных элементов);

для обеспечения требований по восстановлению изделий необходимо сокращение среднего времени восстановления за счет: повышения ремонтпригодности изделия; разработки приспособлений для выполнения восстановительных работ; повышения квалификации инженерно-технического персонала;

для обеспечения требований по долговечности изделий следует предложить способы повышения ресурса за счет конструктивных доработок изделия.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

Таблица П.1.1

## Варианты заданий

№ варианта	Тип самолета	Длительность беспосадочного полета, ч	ФС	Наименование изделия	Тип изделия
1	2	3	4	5	6
1	Ил-62	4,0	СКВ	Турбохолодильник	2280Т
2	Ил-62	4,0	СКВ	Заслонка	2574Т
3	Ил-62	4,0	СКВ	Обратный клапан	2269Т
4	Ил-62	4,0	СКВ	Воздухо-воздушный радиатор	2217Т
5	Ил-62	4,0	СКВ	Регулятор избыточного давления	2940Т
6	Ту-154	2,5	СКВ	Обратный клапан	4672
7	Ту-154	2,5	СКВ	Обратный клапан	5102
8	Ту-154	2,5	СКВ	Заслонка регулирующая	5670
9	Ту-154	2,5	СКВ	Воздухо-воздушный радиатор	4487Т
10	Ту-154	2,5	СКВ	Фильтр-отстойник	5701Т
11	Ту-154	2,5	СКВ	Регулятор избыточного давления	4833
12	Ту-154	2,5	СКВ	Заслонка	3161
13	Як-40	1,3	СКВ	Обратный клапан	1327
14	Як-40	1,3	СКВ	Заслонка	4064АТ
15	Як-40	1,3	СКВ	Регулятор избыточного давления	4608Т
16	Як-40	1,3	СКВ	Турбохолодильник	4629Т
17	Як-40	1,3	СКВ	Обратный клапан	4488Т
18	Як-40	1,3	СКВ	Регулятор подачи воздуха	1408Т

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2****Исходные данные для выполнения задания****Приложение 2.1****Статистические данные по изделиям системы кондиционирования воздуха самолетов Ил-62, Ту-154З, Як-40**

Таблица П.2.1

**Статистические данные наработок до отказа заслонок СКВ**

Тип самолета	Объем парка	Наименование изделия	Наработка до отказа, ч
Ил-62	30	Заслонка 2574Т	920; 970; 1010; 1080; 1095; 1120; 1140; 1300; 1350; 1380; 1700; 1950; 2150; 2300; 2500; 2600
Ту-154	20	Заслонка 5670	840; 845; 970; 1110; 1230; 1280; 1350; 1600; 1720; 1790; 1900; 2100; 2250; 2400; 2500
		Заслонка 3161	560; 580; 610; 730; 870; 925; 1010; 1050; 1100; 1340; 1420; 1560; 2100; 2150; 2500
Як-40	15	Заслонка 4064АТ	725; 780; 840; 890; 910; 915; 945; 980; 1025; 1038; 1200; 1310; 1820; 1950; 2400

Таблица П.2.2

**Статистические данные наработок до отказа обратных клапанов СКВ**

Тип самолета	Объем парка	Наименование изделия	Наработка до отказа, ч
Ил-62	30	Обратный клапан 2269Т	150; 155; 230; 245; 310; 320; 330; 335; 420; 475; 510; 520; 530; 565; 870
Ту-154	20	Обратный клапан 5102	310; 340; 355; 367; 420; 440; 470; 510; 533; 540; 570; 585; 670; 820; 900
		Обратный клапан 4672	327; 395; 450; 470; 520; 535; 540; 570; 610; 620; 637; 780; 800; 950; 1000
Як-40	15	Обратный клапан 1327	125; 130; 185; 210; 230; 235; 240; 257; 310; 320; 345; 400; 470; 520; 710
		Обратный клапан 4488Т	370; 410; 425; 500; 560; 575; 582; 600; 610; 620; 655; 720; 810; 815; 900

Таблица П.2.3

## Статистические данные наработок до отказа ВВР СКВ

Тип самолета	Объем парка	Наименование изделия	Наработка до отказа, ч
Ил-62	30	Воздухо-воздушный радиатор 2217АТ	1010; 1025; 1030; 1210; 1308; 1350; 1470; 1520; 1580; 1670; 1810; 1950
Ту-154	20	Воздухо-воздушный радиатор 4487Т	1025; 1110; 1180; 1250; 1275; 1280; 1310; 1340; 1405; 1560; 1720; 1880

Таблица П.2.4

## Статистические данные наработок до отказа регуляторов давления СКВ

Тип самолета	Объем парка	Наименование изделия	Наработка до отказа, ч
Ил-62	30	Регулятор избыточного давления 2940Т	1050; 1055; 1110; 1115; 1210; 1240; 1370; 1400; 1520; 1540; 1570; 1750; 1820; 1870; 1950
Ту-154	20	Регулятор избыточного давления 4833	1310; 1340; 1370; 1450; 1520; 1615; 1700; 1810; 1825; 1900; 1940; 2000
Як-40	15	Регулятор избыточного давления 4608Т	1400; 1480; 1495; 1520; 1670; 1710; 1800; 1820; 1900
		Регулятор избыточного давления 1408Т	1370; 1450; 1520; 1610; 1620; 1740; 1800; 1850; 1950

Таблица П.2.5

## Статистические данные наработок до отказа турбохолодильников СКВ

Тип самолета	Объем парка	Наименование изделия	Наработка до отказа, ч
Ил-62	30	Турбохолодильник 2280Т	570; 580; 595; 610; 640; 730; 735; 810; 870; 900
Як-40	15	Турбохолодильник 4629Т	1050; 1120; 1140; 1185; 1210; 1245; 1370; 1420; 1545; 1670; 2100; 2500

Таблица П.2.6

## Статистические данные наработок до отказа фильтров СКВ

Тип самолета	Объем парка	Наименование изделия	Наработка до отказа, ч
Ту-154	20	Фильтр-отстойник 5701Т-03	170; 185; 193; 210; 215; 240; 275; 310; 325; 403; 455; 478; 501; 540; 595

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ НАРАБОТОК  
ДО ЦЕНЗУРИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ СКВ  
(МНОГОКРАТНО ЦЕНЗУРИРОВАННАЯ ВЫБОРКА)**

Тип с-та	Объем парка	Наименование изделия	Кол-во на с-те	Наработка до цензурирования, м [ч]
1	2	3	4	5
Ил-62	30	Заслонка 2574Т	5	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 134$ $m_1 = 50$ по 1010 $m_2 = 50$ по 1700 $m_3 = 34$ по 2500
Ту-154	20	Заслонка 5670	4	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 65$ $m_1 = 15$ по 1110 $m_2 = 25$ по 1500 $m_3 = 25$ по 2500
		Заслонка 3161	2	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 25$ $m_1 = 10$ по 730 $m_2 = 10$ по 1420 $m_3 = 5$ по 2500
Як-40	15	Заслонка 4064АТ	2	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 15$ $m_1 = 5$ по 800 $m_2 = 5$ по 1500 $m_3 = 5$ по 2400
Ил-62	30	Обратный клапан 2269Т	4	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 105$ $m_1 = 50$ по 300 $m_2 = 20$ по 450 $m_3 = 35$ по 870
Ту-154	20	Обратный клапан 5102	4	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 65$ $m_1 = 25$ по 450 $m_2 = 20$ по 700 $m_3 = 20$ по 900
		Обратный клапан 4672	3	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 45$ $m_1 = 15$ по 450 $m_2 = 20$ по 780 $m_3 = 10$ по 1000
Як-40	15	Обратный клапан 1327	6	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 75$ $m_1 = 25$ по 200 $m_2 = 25$ по 630 $m_3 = 25$ по 710
		Обратный клапан 4488Т	2	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 15$ $m_1 = 5$ по 500 $m_2 = 5$ по 720 $m_3 = 5$ по 900
Ил-62	30	Воздухо-воздушный радиатор 2217АТ	2	$m = m_1 + m_2 + m_3 = 48$ $m_1 = 18$ по 1350 $m_2 = 10$ по 1670 $m_3 = 20$ по 1950

## Приложение 2.2

**Принципиальные схемы СКВ  
самолетов Ил-62, Ту-154, Як-40**

Таблица П.2.8

## Система кондиционирования воздуха самолета Ил-62

Позиции на схеме	Наименование агрегата	Тип агрегата	Количество на самолете
1, 3, 11, 9, 52, 54, 59, 61	Переключатель электромагнитный	4038Т	8
2, 10, 53, 60	Командный прибор	4211АТ	4
4, 16, 51, 65	ВВР предварительного охлаждения	2793АТ	4
5, 12, 55, 62	Задатчик расхода воздуха	2785Т	4
6, 13, 56, 63	Исполнительный механизм	4149АТ	4
7, 14, 38, 65	Термовыключатель	1374А-6	4
8, 15, 57, 64	Заслонка продувочного воздуха	4084Т	8
17, 18, 49, 50, 67	Заслонка	2574Т	5
19, 48	Исполнительный механизм	4149Т	4
21, 46	Клапан регулятора (2940Т)	2990Т	2
23, 44	Регулятор избыточного давления	2940Т	2
24, 43	ВВР охлаждения	2251АТ	2
25, 42	Командный прибор	1300ДТ	2
26, 41	ВВР обогрева	2217АТ	2
27, 40	Трехканальный блок заслонок	2235Т	2
28, 39	Датчик расхода воздуха	4061БТ	2
29, 38	Водоотделитель	2394Т	2
30, 37	Блок заслонок	2236Т	2
31, 36	Турбоохладитель	2280Т	2
32, 35	Блок обратных клапанов	2269Т	2
33, 34	Блок заслонок	1932Т	2
69, 70	Задвижка	1884Т	2
71, 72	Термовыключатель	1374А-4	2
68	Заслонка перекрывающая	4074Т	3



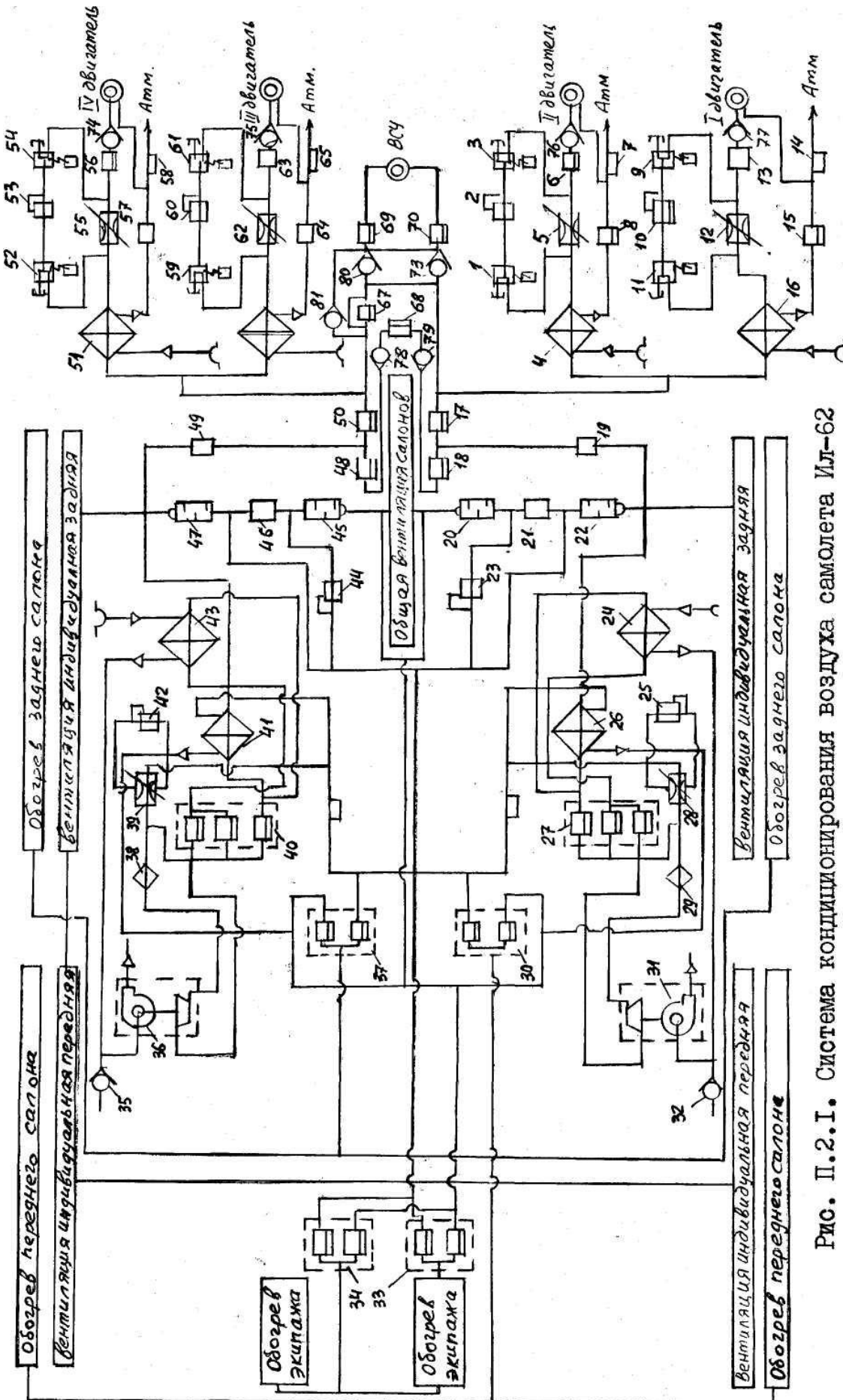


Рис. П.2.1. Система кондиционирования воздуха самолета Ил-62

Таблица П.2.9

## Система кондиционирования воздуха самолета Ту-154

Позиции на схеме	Наименование агрегата	Тип агрегата	Количество на самолете
1, 21, 32	Обратный клапан	4672	3
2	Штуцер для подключения наземного кондиционера		1
3, 53, 55	Кран отбора воздуха от двигателей		3
4, 5, 54, 56, 57	Обратный клапан	5102	4
6	Первичный ВВР	4487Г	1
7, 46	Кран наддува	4602	2
8, 45	Заслонка ПСВП	5701Г-02	2
9, 44	Регулятор избыточного давления	4561	2
10, 43	Командный прибор ПСВП	5701Г-01	2
11, 42	Трубка Вентури 76×95		2
12, 41	Регулятор избыточного давления	4833	2
13, 18, 35, 40	Заслонка регулирующая	5670	4
15, 38	Обратный клапан	4488	2
16, 37, 47	Воздухозаборник		3
17, 36	Вторичный ВВР	4458	2
19, 34	Обратный клапан	4477	2
20, 33	Влагоотделитель	154. 04. 7613. 023	2
22, 24, 27, 28	Смеситель	154. 04. 7611. 003	4
23, 25, 26, 29	Заслонка регулирующая	1406Г	4
30	Регулятор избыточного давления	4833	1
31	Глушитель шума	154. 04. 7613. 044	1
48	Эжектор продува ВВР	4467Г	1
49	Заслонка	3161	2
50	Электроклапан	4073Г	1
51, 52	Обратный клапан	4656	2
Не показан	Фильтр-отстойник	5701Г-03	4

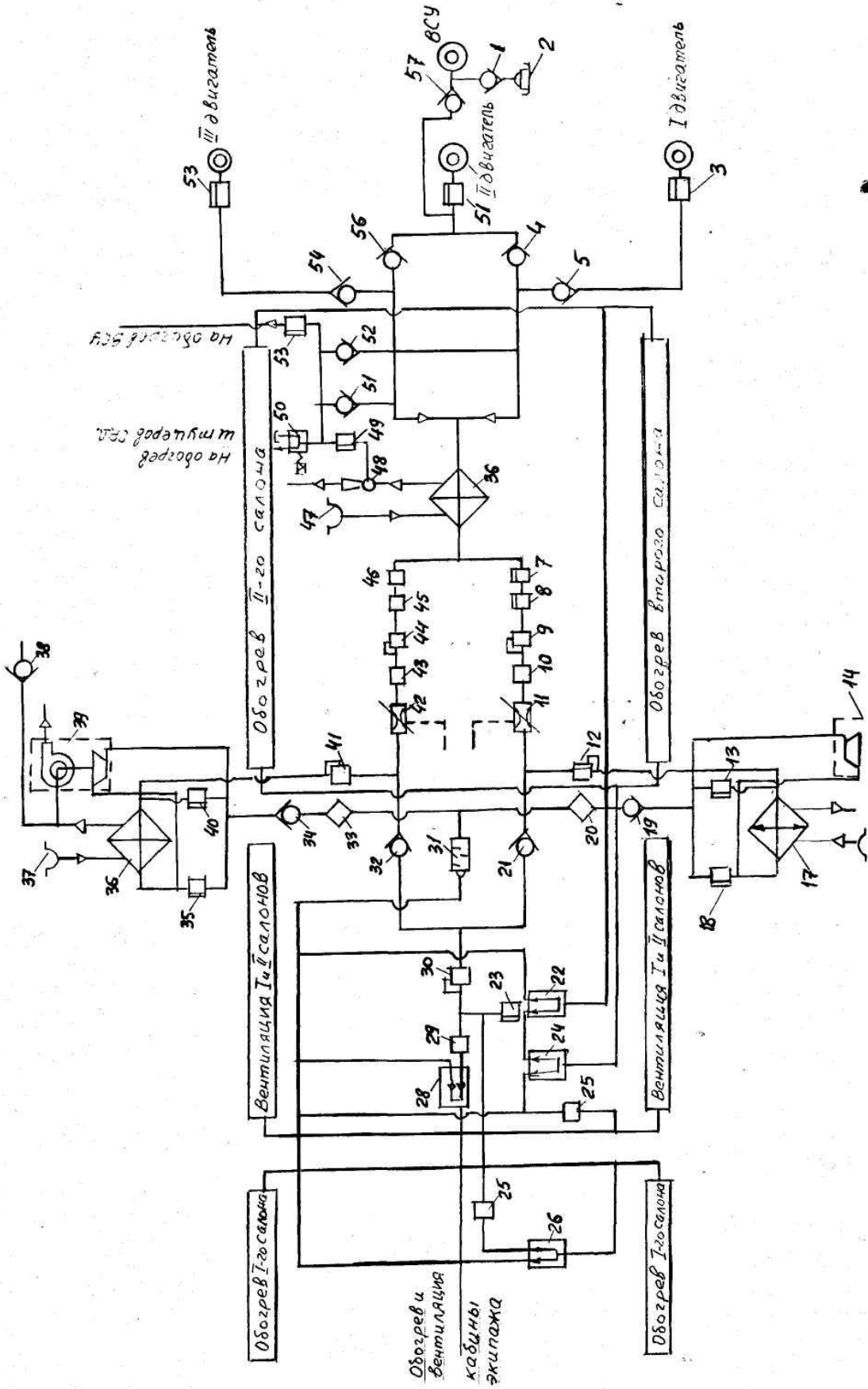


Рис. П.2.2.2. Система кондиционирования воздуха самолета Ту-154

Таблица П.2.10

## Система кондиционирования воздуха самолета Як-40

Позиции на схеме	Наименование агрегата	Тип агрегата	Количество на самолете
1, 7, 26	Двигатели	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	Турбоохладитель	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

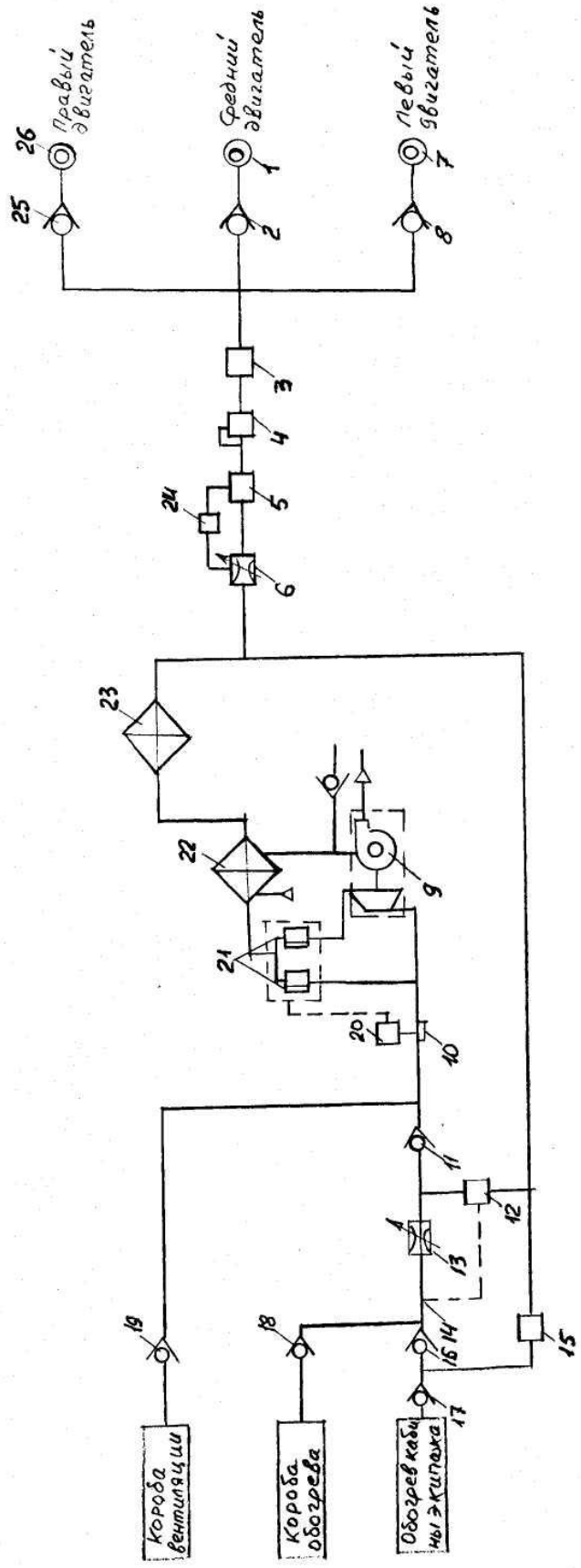
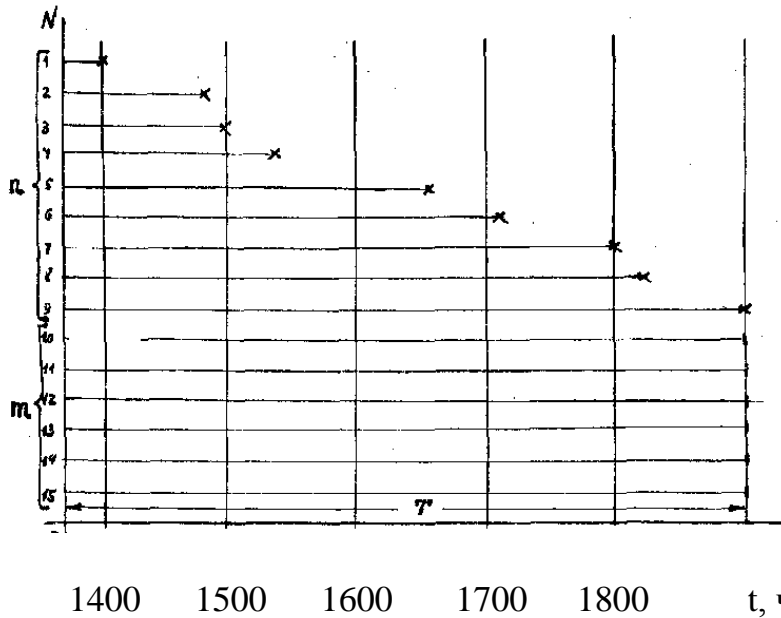


Рис. П.2.3. Система кондиционирования воздуха самолета Як-40

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Оценка безотказности изделий параметрическим методом



1400 1500 1600 1700 1800  $t$ , ч  
 Рис. П.3.1. Ранжированная временная диаграмма наработок до отказа  $t_{ch}$ ,  $i = 1, n$ , и наработок до цензурирования  $\tau_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  (однократно цензурированная выборка).

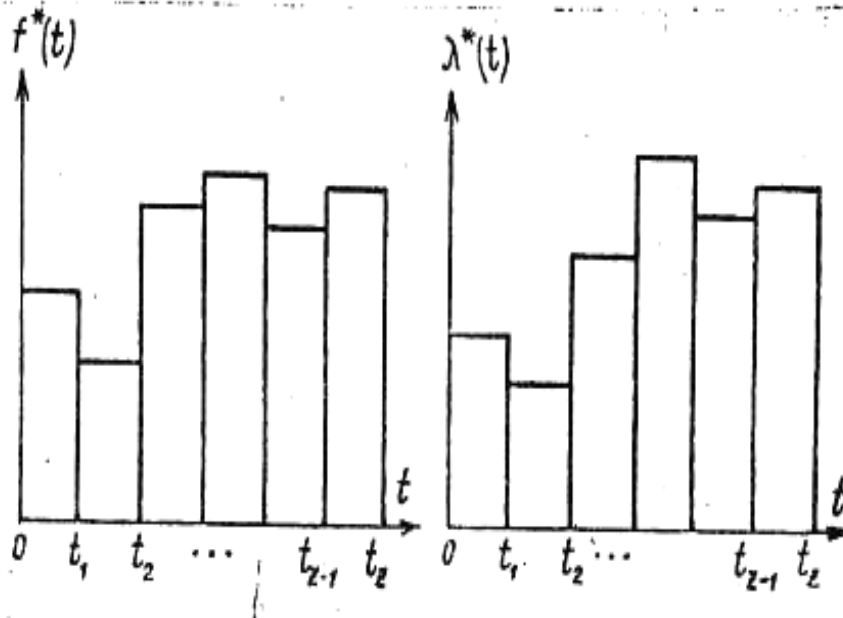


Рис. П.3.2. Гистограммы статистических оценок  $f^*(t)$ ,  $\lambda^*(t)$ .

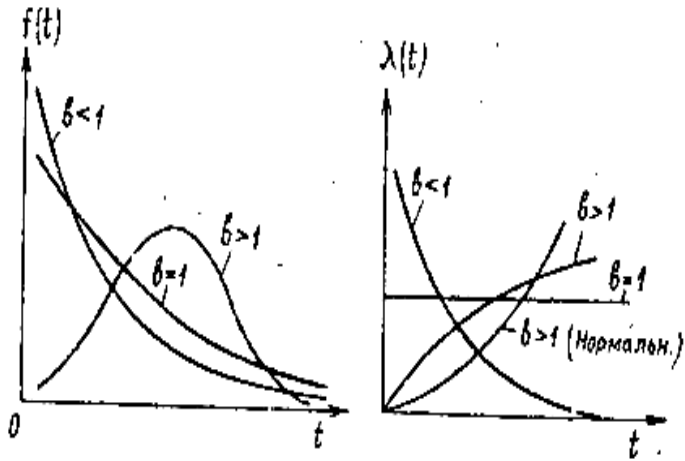


Рис. П.3.3. Теоретические зависимости  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  для различных законов распределения: экспоненциального ( $b=1$ ), нормального ( $b>1$ ), Вейбулла ( $b<1, b>1$ ).

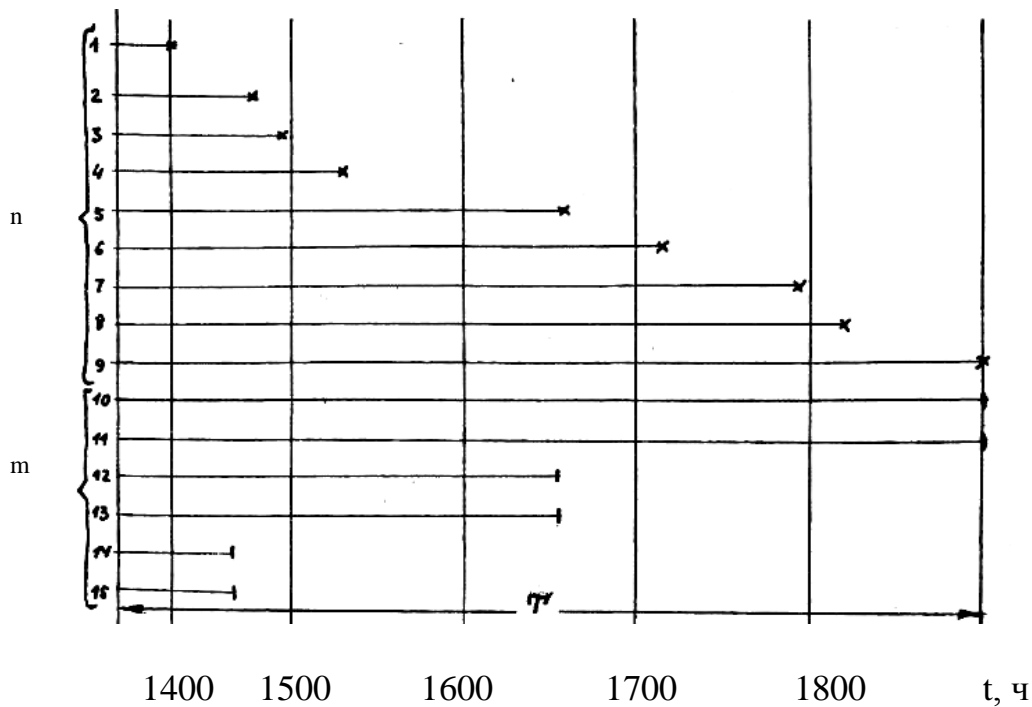


Рис. П.3.4. Ранжированная временная диаграмма наработок до отказа  $t_i, i = 1, n$ , и наработок до цензурирования  $\tau_j, j = 1, m$  (многократно цензурированная выборка).

Таблица П. 3.1

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ  
ПО ПАРАМЕТРАМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Законы распределения плотности, $f(t)$	Средняя наработка до отказа, $T_{cp}$	Вероятность безотказной работы, $P(t)$	Интенсивность отказа, $\lambda(t)$	Гамма-процентная наработка, $T_\gamma$
Экспоненциальный $\lambda e^{-\lambda t}$	$1/\lambda$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda$	$\frac{1}{\lambda} (-\ln \frac{\delta}{100})$
Вейбулла $\frac{b}{a} (\frac{t}{a})^{b-1} e^{-\frac{t}{a}^b}$	$a \Gamma(1 + \frac{1}{b})$	$e^{-\frac{1}{a} t^b}$	$\frac{b}{a} t^{b-1}$	$a (-\ln \frac{\delta}{100})^{\frac{1}{b}}$
Нормальный $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}$	$a$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \times \Phi(\frac{t-a}{\sigma})$	$\frac{1}{\sigma} \varphi(\frac{t-a}{\sigma})$ $\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi(\frac{t-a}{\sigma})$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi(\frac{t-a}{\sigma}) = \frac{\delta}{100}$

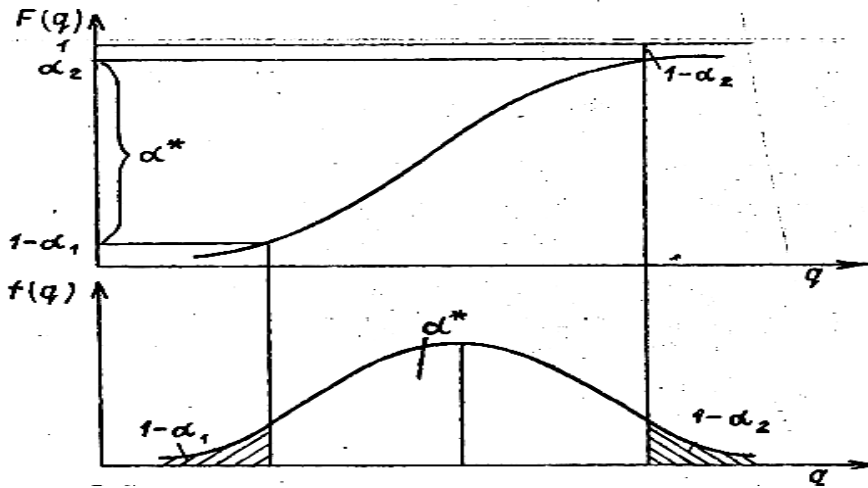


Рис. П.3.5. Определение доверительных границ.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Примеры оценок показателей безотказности изделий непараметрическим методом

Пример П.4.1. При испытании  $N=100$  невосстанавливаемых изделий получено  $n = 10$  отказов. Найти доверительные границы для вероятности безотказной работы  $P$  при  $\alpha=0,95$ , где  $\alpha$  - доверительная вероятность.

По табл. П.5.5, П.5.6 приложения 4 для  $n=10$  и  $n/N=0,1$  находим  $R_1=1,81$ ,  $R_2=0,61$ .

По уравнениям (4.13) находим

$$q_H = \frac{n}{NR_1} = \frac{10}{100 \cdot 1,81} = 0,055,$$

$$q_B = \frac{n}{NR_2} = \frac{10}{100 \cdot 0,61} = 0,164.$$

Для вероятности безотказной работы

$$P = 1 - 0,1 = 0,9,$$

$$P_H = 1 - q_B = 1 - 0,164 = 0,836,$$

$$P_B = 1 - q_H = 1 - 0,055 = 0,945.$$

Пример П.4.2. При испытании  $N = 100$  невосстанавливаемых изделий не получено ни одного отказа. Найти доверительные границы для вероятности безотказной работы при  $\alpha = 0,90$ . По табл. П.5.4 приложения 5 для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ ,  $n = 0$ ,  $N = 100$

находим  $R_0 = 2,28$ . По уравнению (4.12) для вероятности отказа получим  $q_H = 0$ ;

$$q_B = R_0/N = 2,28/100 = 0,0228.$$

Для вероятности безотказной работы будем иметь

$$P = 1 - 0,1 = 0,9,$$

$$P_H = 1 - q_B = 0,977,$$

$$P_B = 1 - q_H = 1,0.$$

Пример П.4.3. В результате обработки данных по надежности изделий функциональной системы самолетов, эксплуатирующихся по состоянию, были сформированы цензурированные данные 50 изделий.

Наработки до отказа ( $n = 23$ ): 2292, 5440, 880, 2996, 1711, 14610, 10806, 4652, 1638, 1287, 2850, 4830, 2700, 755, 3438, 581, 1904, 23289, 12036, 8550, 742, 1064, 2640 ч.

Наработки до цензурирования ( $m = 27$ ): 25 изделий были сняты с наблюдения при наработке 3600 ч., а два изделия при наработке 25000 ч.

Для внедрения прогрессивного метода эксплуатации изделий на всем парке самолетов требуется оценить показатели надежности.

1) Строим вариационный ряд или ранжированную временную диаграмму наработок до отказа  $\tau_i$ ,  $i = \overline{1, \dots, n}$  и цензурирования  $t_j$ ,  $j = \overline{1, \dots, m}$

581, 742, 755, 880, 1064, 1287, 1638, 1711, 1904, 2292, 2640, 2700, 2850, 2996, 3438, 3600(25), 4652, 4830, 5440, 8550, 10806, 12036, 14610, 23289, 25000 (2).

2) По вариационному ряду ( ранжированной временной диаграмме) определяем интервалы наблюдения ( $I = 2$ )

$$(0, \tau_{15}) \rightarrow (0; 3438),$$

$$(\tau_{16}, \tau_{23}) \rightarrow (3438; 23289).$$

Для каждого интервала наблюдения определяем

$$n_1=15, m_0=0, m_2=2,$$

$$n_2=8,$$

$$N_{\text{э1}} = N - n_0 = 50, N_{\text{э2}} = N_{\text{э1}} \left[ 1 - \frac{m_1}{N - m_0 - n_1} \right] = 50 \left( 1 - \frac{25}{50 - 15} \right) = 14,286..$$

3) Определяем значения эмпирической функции распределения  $F^*(t)$  по (4.14) или (4.15).

Таблица П. 4.1

Значения функции распределения  $F^*(t_i)$

1	$F^*(t_i)$	I	$F^*(t_i)$	I	$F^*(t_i)$	I	$F^*(t_i)$	I	$F^*(t_i)$
1	0,02	6	0,12	11	0,22	41	0,37	46	0,72
2	0,04	7	0,14	12	0,24	42	0,43	47	0,79
3	0,06	8	0,16	13	0,26	43	0,51	48	0,86
4	0,08	9	0,18	14	0,28	44	0,58		
5	0,10	10	0,20	15	0,30	45	0,65		

4) Определим точечные оценки вероятности безотказной работы за 5000, 10000 и 20000 ч.

Заданные наработки:

$$t^1_3 = 5000 \text{ ч}; I = 43; \tau_i = 5440; \tau_{i-1} = 4830;$$

$$d_i = (t^1_3 - \tau_{i-1}) / (\tau_i - \tau_{i-1}) = (5000 - 4830) / (5440 - 4830) = 0,279$$

$$P^*(5000) = 1 - [d_i F^*(t_i) + (1 - d_i) F^*(t_{i-1})] = 1 - (0,279 \cdot 0,51 + 0,721 \cdot 0,43) = 0,55$$

$$t^2_3 = 10000 \text{ ч}, I = 45, \tau_i = 10806; \tau_{i-1} = 8550;$$

$$d_i = (t^2_3 - \tau_{i-1}) / (\tau_i - \tau_{i-1}) = (10000 - 8550) / (10806 - 8550) = 0,567$$

$$P^*(10000) = 1 - (0,567 \cdot 0,65 + 0,433 \cdot 0,58) = 0,38,$$

$$t^3_3 = 20000 \text{ ч}; I = 48; \tau_i = 23289; \tau_{i-1} = 14610;$$

$$d_i = (t^3_3 - \tau_{i-1}) / (\tau_i - \tau_{i-1}) = (20000 - 14610) / (23289 - 14610) = 0,621$$

$$P^*(20000) = 1 - (0,621 \cdot 0,86 + 0,379 \cdot 0,79) = 0,16.$$

5) Определим среднюю наработку до отказа

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{15} \tau_i}{50} + \frac{\sum_{i=41}^{48} \tau_i}{14,286} + (1 - 0,86)\tau_{48} = \frac{27478}{50} + \frac{84213}{14,286} + 0,14 \cdot 23289 = 9705 \text{ ч}$$

6) Вычисление 95% - й наработки до отказа показывает, что она лежит между вторым и третьим членами вариационного ряда (таб. П.4.1),

$$\text{т.е. } F^*(t_i) = 0,05, \text{ следовательно, } i = 3; F^*(t_{i-1}) = 0,04;$$

$$F^*(t_i) = 0,06; \tau_{i-1} = 742 \text{ и } \tau_i = 755;$$

$$d_2 = ((100 - \gamma) / 100 - F^*(\tau_{i-1})) / (F^*(\tau_i) - F^*(\tau_{i-1})) = (0,05 - 0,04) / 0,02 = 0,5.$$

$$T^*_{\gamma} = (1 - d_2) \tau_{i-1} + d_2 \tau_i = 0,5 \cdot 742 + 0,5 \cdot 755 = 748,5 \text{ ч.}$$

7) Доверительный интервал для значений вероятностей безотказной работы  $P^*(t_3)$  оценим, задавшись доверительной вероятностью  $\beta = 0,95$ .

$$t_3^1 = 5000 \text{ ч; } I_{-1} = 42; \quad I = 43; \quad l = 2, \text{ во втором интервале:}$$

$$v = 23; \quad \hat{v} = 25;$$

$$\sigma_i = [1 - 0,43] \sqrt{18 / (25 \cdot 27)} = 0,57 \cdot 0,14 = 0,08,$$

Для  $\beta = 0,95$  (односторонние доверительные границы)  $U_{\beta} = 1,645$ ;

$$P_H = P^*(t_3) - U_{\beta} \sigma_i = 0,55 - 1,645 \cdot 0,08 = 0,42$$

$$P_B = P^*(t_3) + U_{\beta} \sigma_i = 0,55 + 1,645 \cdot 0,08 = 0,68$$

$$t_3 = 10000 \text{ ч, } I_{-1} = 44, \quad I_i = 45, \quad l = 2$$

$$\sigma_i = [1 - 0,58] \sqrt{20 / (25 \cdot 27)} = 0,06,$$

$$P_H = 0,38 - 1,645 \cdot 0,06 = 0,282;$$

$$P_B = 0,38 + 1,645 \cdot 0,06 = 0,478$$

$$t_3 = 20000 \text{ ч, } I_{-1} = 47, \quad I = 48, \quad l = 2$$

$$\sigma_i = [1 - 0,86] \sqrt{23 / (25 \cdot 27)} = 0,02,$$

$$P_H = 0,16 - 1,645 \cdot 0,02 = 0,128,$$

$$P_B = 0,16 + 1,645 \cdot 0,02 = 0,192,$$

Результаты оценки приведены на рис. П. 4.1.

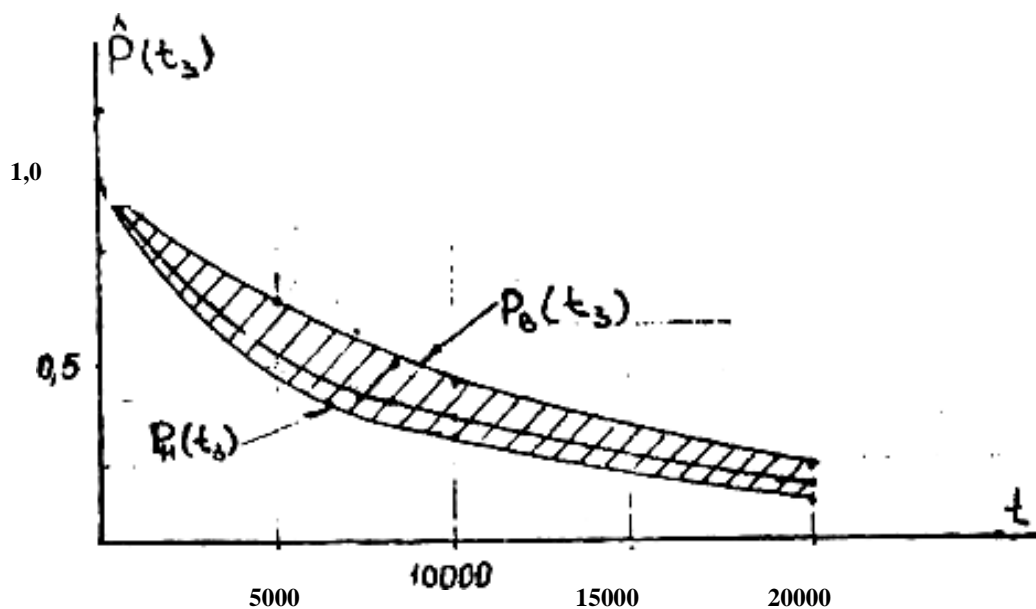


Рис. П.4.1. Оценка доверительных интервалов  $P(t_3)$

Вывод.

Из-за низкой надежности ( $P^*(t = 10000) < 0,3$ ) после наработки 10000ч гидравлические фильтры эксплуатировать нецелесообразно.

Значение средней наработки до отказа  $T^*$  показывает целесообразность замены изделий на I-ю категорию с периодичностью в 9705 ч.

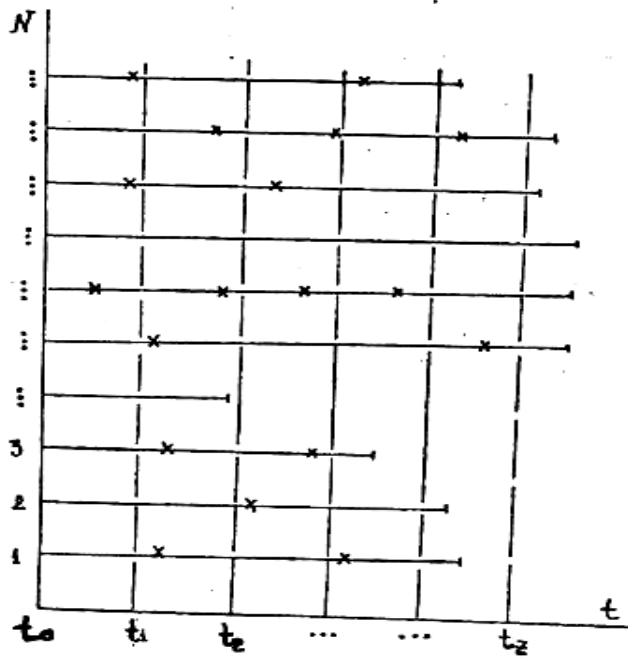


Рис. П.4.2. Временная диаграмма однотипных восстанавливаемых изделий:  $N$  – число наблюдаемых объектов ( $N = N_0k$ );  $N_0$  – число самолетов,  $k$  – число однотипных изделий на самолете.

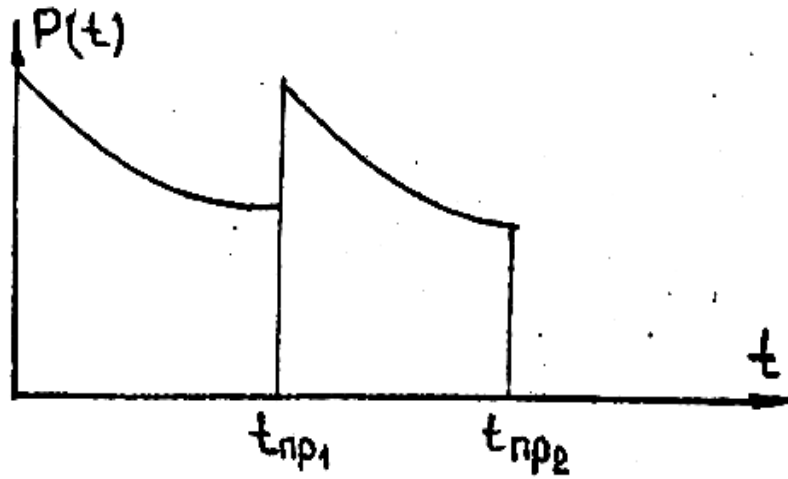


Рис. П.4.3. График  $P(t)$  для восстанавливаемых изделий.

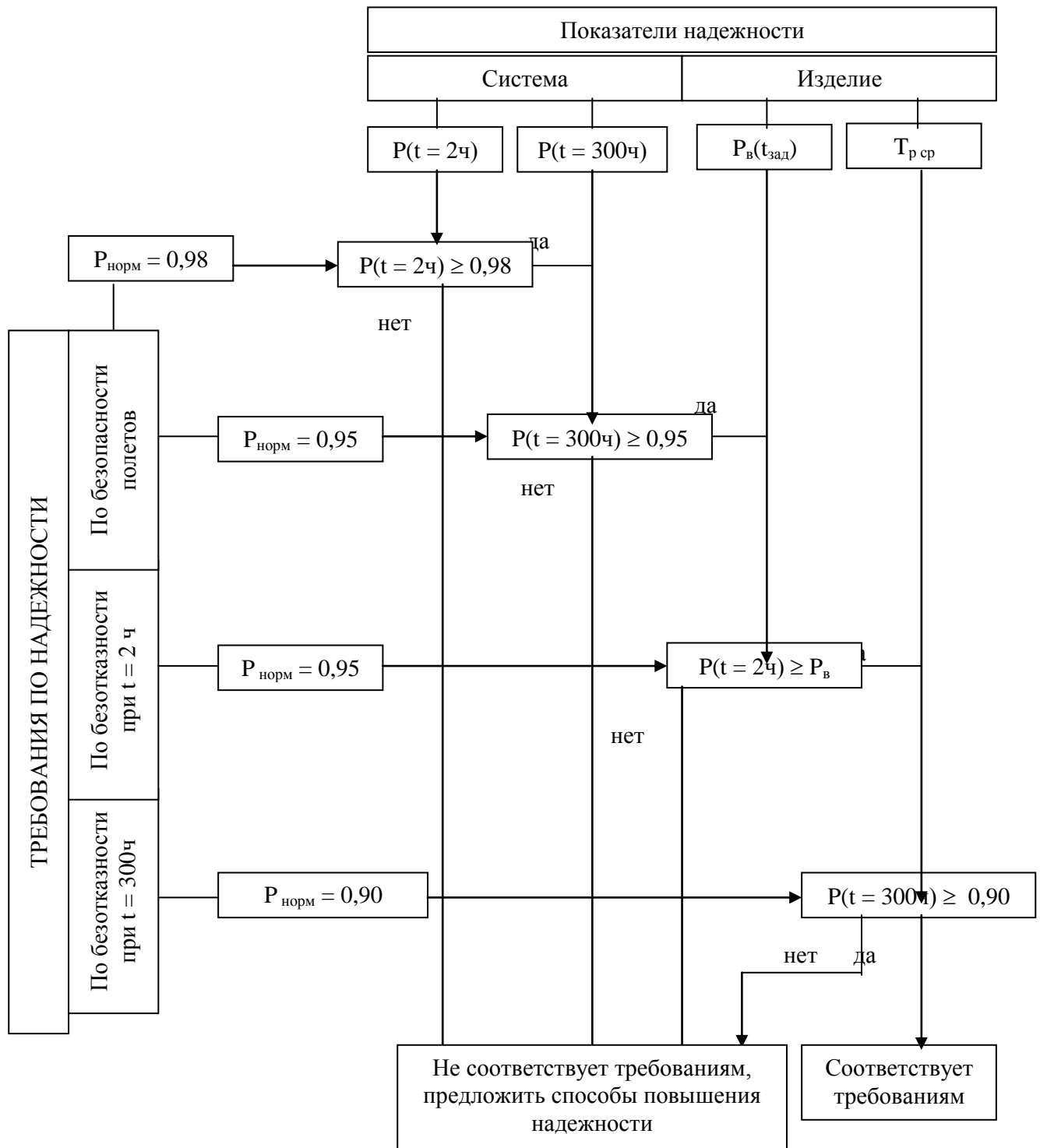


Рис. П. 4.4. Алгоритм анализа надежности СКВ самолета и ее изделий на соответствие требованиям надежности при эксплуатации

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

## Таблицы характеристик распределения случайных величин

Таблица П. 5.1

Функция стандартного нормального распределения  $\hat{O}_0(X)$ 

X		0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319
0.1	0	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714
0.2	0	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103
0.3	0	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480
0.4	0	6554	6591	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844
0.5	0	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190
0.6	0	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517
0.7	0	7580	7611	7642	7673	7704	7344	7764	7794	7823
0.8	0	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106
0.9	0	8159	8186	8212	8238	8264	8289	8315	8340	8365
1	0	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599
1.1	0	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810
1.2	0	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997
1.3	0.9	0320	0490	0658	0824	0988	1149	1308	1466	1621
1.4	0.9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056
1.5	0.9	3319	3448	3574	3699	3822	3943	4062	4179	4295
1.6	0.9	4520	4630	4738	4845	4950	5053	5154	5254	5352
1.7	0.9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246
1.8	0.9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995
1.9	0.9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7558	7615
2	0.9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124
2.1	0.9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537
2.2	0.9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870
2.3	0.9	8928	8956	8983	9010	9036	9061	9086	9111	9134
2.4	0.99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431
2.5	0.99	3790	3963	4132	4297	4457	4614	4766	4915	5060
2.6	0.99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319
2.7	0.99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282
2.8	0.99	7445	7523	7599	7673	7744	7814	7882	7948	8012
2.9	0.99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559
3	0.99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965





Таблица П.5.2  
Плотность стандартного нормального распределения  $f(x)$

$x$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$z$
0.0	0.3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973	0.0
0.1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918	0.1
0.2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825	0.2
0.3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697	0.3
0.4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538	0.4
0.5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352	0.5
0.6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144	0.6
0.7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2965	2943	2920	0.7
0.8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685	0.8
0.9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444	0.9
1.0	0.2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203	1.0
1.1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965	1.1
1.2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736	1.2
1.3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518	1.3
1.4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315	1.4
1.5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127	1.5
1.6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957	1.6
1.7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804	1.7
1.8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681	0669	1.8
1.9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551	1.9
2.0	0.0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459	0449	2.0
2.1	0440	0431	0422	0413	0404	0396	0388	0379	0371	0363	2.1
2.2	0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297	0290	2.2
2.3	0283	0277	0270	0264	0258	0252	0246	0241	0235	0229	2.3
2.4	0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184	0180	2.4
2.5	0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143	0139	2.5
2.6	0136	0132	0129	0126	0122	0119	0116	0113	0110	0107	2.6
2.7	0104	0101	0099	0096	0093	0091	0088	0086	0084	0081	2.7
2.8	0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063	0061	2.8
2.9	0060	0058	0056	0055	0053	0051	0050	0048	0047	0046	2.9
3.0	0.0044	0043	0042	0040	0039	0038	0037	0036	0035	0034	3.0
3.1	0033	0032	0031	0030	0029	0028	0027	0029	0025	0025	3.1
3.2	0024	0023	0022	0022	0021	0020	0020	0019	0018	0018	3.2
3.3	0017	0017	0016	0016	0015	0015	0014	0014	0013	0013	3.3
3.4	0012	0012	0012	0011	0011	0010	0010	0010	0009	0009	3.4
3.5	0009	0008	0008	0008	0008	0007	0007	0007	0007	0006	3.5
3.6	0006	0006	0006	0005	0005	0005	0005	0005	0005	0004	3.6
3.7	0004	0004	0004	0004	0004	0004	0003	0003	0003	0003	3.7
3.8	0003	0003	0003	0003	0003	0002	0002	0002	0002	0002	3.8
3.9	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001	0001	3.9

Таблица П. 5.3

## Коэффициенты для распределения Вейбулла

b	$K_b$	$C_b$	V
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	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	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	0.886	0.463	0.523
2.1	0.886	0.441	0.489
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	0.893	0.326	0.365
3.5	0.900	0.285	0.316
4	0.906	0.255	0.281

$$m_t^* = a K_b, \sigma_t = a C_b$$

Квантили  $\chi^2$  - распределения

число степеней свободы	$\chi^2_{0,1}$	$\chi^2_{0,3}$	$\chi^2_{0,5}$	$\chi^2_{0,7}$	$\chi^2_{0,9}$	$\chi^2_{0,95}$	$\chi^2_{0,99}$	$\chi^2_{0,999}$
1	0,016	0,148	0,455	1,07	2,71	3,84	6,63	10,8
2	0,211	0,713	1,39	2,41	4,61	5,99	9,21	13,8
3	0,594	1,42	2,37	3,67	6,25	7,81	11,3	16,3
4	1,06	2,19	3,36	4,88	7,78	8,49	13,3	18,5
5	1,61	3,00	4,35	5,06	9,24	11,1	15,1	20,5
6	2,20	3,83	5,35	7,23	10,6	12,6	16,8	22,5
7	2,83	4,67	6,35	8,38	12,0	14,1	18,5	24,3
8	3,49	5,53	7,34	9,52	13,4	15,5	20,1	26,1
9	4,17	6,39	8,34	10,7	14,7	16,9	21,7	27,9
10	4,87	7,27	9,34	11,8	16,0	18,3	23,2	29,6
11	5,58	8,15	10,3	12,9	17,3	19,7	24,7	31,3
12	6,30	9,03	11,3	14,0	18,5	21,0	26,2	32,9
13	7,04	9,93	12,3	15,1	19,8	22,4	27,7	34,5
14	7,79	10,88	13,3	16,2	21,1	23,7	29,1	36,1
15	8,55	11,7	14,3	17,3	22,3	25,0	30,6	37,7
16	9,31	12,6	15,3	18,4	23,5	26,3	32,0	39,3
17	10,1	13,5	16,3	19,5	24,8	27,6	33,4	40,8
18	10,9	14,4	17,3	20,6	26,0	28,9	34,8	42,3
19	11,7	15,4	18,3	21,7	27,2	30,1	36,2	43,8
20	12,4	16,3	19,3	22,8	28,4	31,4	37,6	45,3
21	13,2	17,2	20,3	23,9	29,6	32,7	38,9	46,8
22	14,0	18,1	21,3	24,0	30,8	33,9	40,3	48,3
23	14,8	19,0	22,3	26,0	32,0	35,2	41,6	49,7
24	15,7	19,9	23,3	27,1	33,2	36,4	43,0	51,2
25	16,5	20,9	24,3	28,2	34,4	37,7	44,3	52,6
26	17,3	21,8	25,3	29,2	35,6	38,9	45,6	54,1
27	18,1	22,7	26,3	30,3	36,7	40,1	47,0	55,5
28	18,9	23,6	27,3	31,4	37,9	41,3	48,3	56,9
29	19,8	24,6	28,3	32,5	39,1	42,6	49,6	58,3
30	20,6	25,5	29,3	33,5	40,3	43,8	50,9	59,7

Значения коэффициента  $R_0$ 

$N \backslash \alpha$	0,999	0,990	0,975	0,900	0,950	0,800
1	1,00	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80
2	1,94	1,80	1,68	1,55	1,37	1,11
3	2,70	2,35	2,12	1,89	1,61	1,25
4	3,29	2,74	2,41	2,11	1,75	1,32
5	3,74	3,01	2,61	2,25	1,85	1,38
6	4,10	3,22	2,76	2,36	1,91	1,41
7	4,39	3,37	2,87	2,44	1,96	1,44
8	4,63	3,50	2,96	2,50	2,00	1,46
9	4,82	3,60	3,03	2,55	2,03	1,47
10	4,99	3,69	3,08	2,59	2,06	1,49
12	5,25	3,82	3,18	2,65	2,09	1,51
14	5,45	3,92	3,24	2,70	2,12	1,52
16	5,61	4,00	3,29	2,73	2,14	1,53
18	5,74	4,06	3,33	2,76	2,16	1,54
20	5,84	4,11	3,37	2,78	2,18	1,55
25	6,04	4,21	3,43	2,82	2,20	1,56
30	6,17	4,27	3,47	2,85	2,22	1,57
35	6,27	4,31	3,50	2,87	2,23	1,57
40	6,34	4,35	3,52	2,89	2,24	1,58
50	6,45	4,40	3,56	2,91	2,25	1,58
60	6,52	4,43	3,58	2,92	2,26	1,59
80	6,62	4,48	3,60	2,94	2,27	1,59
100	6,67	4,50	3,62	2,95	2,28	1,60
200	6,79	4,55	3,66	2,97	2,29	1,60
300	6,83	4,57	3,67	2,98	2,29	1,61
500	6,86	4,58	3,68	2,99	2,30	1,61
1000	6,88	4,59	3,68	3,00	2,30	1,61
	6,91	4,60	3,69	3,00	2,30	1,61

$$R_0 = N(1 - \sqrt{1 - \alpha}),$$

$$P_0 = \frac{R_0}{H}.$$

Таблица П.5.6

Значения коэффициента  $R_1$  при  $\alpha = 0,95$ 

$n$	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
1	19,5	19,5	19,6	19,6	19,7	19,7
2	5,63	5,53	5,44	5,35	5,26	5,15
3	3,66	3,60	3,52	3,44	3,36	3,27
4	2,93	2,87	2,81	2,74	2,67	2,59
5	2,54	2,49	2,43	2,37	2,31	2,25
6	2,29	2,26	2,20	2,15	2,09	2,04
8	2,01	1,98	1,93	1,89	1,84	1,79
10	1,82	1,81	1,78	1,74	1,70	1,66
15	1,62	1,60	1,58	1,54	1,51	1,48
20	1,51	1,49	1,46	1,44	1,41	1,39
25	1,44	1,42	1,40	1,38	1,35	1,33
30	1,39	1,37	1,35	1,34	1,31	1,29
40	1,32	1,31	1,30	1,28	1,25	1,24
50	1,28	1,27	1,26	1,24	1,23	1,21
60	1,25	1,25	1,23	1,22	1,21	1,20
80	1,21	1,21	1,20	1,19	1,18	1,17
100	1,19	1,18	1,17	1,16	1,16	1,15
150	1,15	1,14	1,14	1,13	1,12	1,12
200	1,13	1,12	1,12	1,11	1,10	1,10
250	1,11	1,11	1,10	1,10	1,09	1,09
300	1,10	1,10	1,09	1,09	1,08	1,08
400	1,09	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07
500	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
600	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,05
800	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05
1000	1,06	1,06	1,06	1,05	1,04	1,04

$$P_n = \frac{n}{NR_1}$$

Таблица П.5.7.

Значения коэффициента  $R_2$  при  $\lambda = 0,95$ 

$n$	$l/N$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1		0,21	0,25	0,30	0,37	0,45	0,51
2		0,32	0,35	0,39	0,44	0,49	0,55
3		0,39	0,42	0,45	0,49	0,53	0,59
4		0,44	0,47	0,50	0,53	0,57	0,62
5		0,48	0,50	0,53	0,57	0,59	0,64
6		0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,66
8		0,55	0,56	0,60	0,63	0,66	0,69
10		0,59	0,61	0,63	0,66	0,69	0,72
15		0,65	0,67	0,69	0,71	0,74	0,76
20		0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78
25		0,72	0,73	0,74	0,76	0,78	0,80
30		0,74	0,75	0,76	0,78	0,80	0,82
40		0,77	0,78	0,79	0,80	0,82	0,84
50		0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,85
60		0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86
80		0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88
100		0,85	0,86	0,86	0,87	0,88	0,89
150		0,87	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91
200		0,89	0,90	0,90	0,91	0,91	0,92
250		0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	0,93
300		0,91	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93
400		0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94
500		0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95
600		0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95
800		0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96
1000		0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97

$$\Gamma_B = \frac{n}{NR_2}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

**Кафедра технической эксплуатации ЛАиАД**

«Проверена»  
Руководитель КР

\_\_\_\_\_

(степень, звание, Ф. И. О.)

(подпись, дата)

«Защищена»

с оценкой \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

(подпись) (Ф. И. О.)

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА**

**«Оценка показателей надежности  
авиационной техники»**

**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**«ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ»**

Шифр студента:

Контрольную работу  
вариант № \_\_\_\_\_ выполнил

студент \_\_\_\_\_

(Ф. И. О.)

группа \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_

(дата)

Москва – 20 \_\_\_\_ г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Основы теории надежности. Ч.1. Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2013.
2. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и авиадвигателей. Ч.2. Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 1995.
3. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. и др. Надежность и эксплуатационная технологичность ЛА. – М.: МИИГА, 1989.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения.....	3
2. Структура контрольной работы.....	4
3. Техническое задание.....	4
4. Методические указания по решению задач .....	7
Приложения:	
Приложение 1. Варианты заданий .....	19
Приложение 2. Исходные данные для выполнения задания .....	20
Приложение 3. Оценка показателей безотказности изделий параметрическим методом .....	29
Приложение 4. Примеры оценок показателей безотказности изделий непараметрическим методом .....	30
Приложение 5. Таблицы характеристик распределения случайных величин.....	38
Приложение 6. Титульный лист контрольной работы .....	46
Список литературы.....	47