МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Ивановский государственный политехнический университет

Автомобильно-дорожный факультет

Кафедра «Автомобили и автомобильное хозяйство»

ПРАКТИКУМ

по курсу

«Надежность и безопасность ТиТТМО»

для студентов, обучающихся по направлению 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

ИВАНОВО 2015

УДК:

Практикум по курсу «Надежность и безопасность ТиТТМО» для студентов, обучающихся по направлению 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов / В. А. Масленников. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», 2015. – 130с.

Рецензенты: Гвоздев А. А., д.т.н., профессор кафедры «Технический сервис» ФГБОУ ВПО «Ивановская ГСХА имени академика Д. К. Беляева», Орешков Е. Л., к.т.н., доцент кафедры «Организация и безопасность движения» ФГБОУ ВО «Ивановский государственных политехнический университет».

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Начало двадцать первого века знаменуется бурным развитием науки и техники, прямым следствием которого является появление машин высокой конструктивной сложности, имеющих в своей структуре элементы и системы элементов, в основе работы которых лежат принципы механики, теплотехники, гидравлики, электроники, автоматики и т.п. Без обеспечения устойчивой и бесперебойной связи между этими элементами и системами функционирование машины невозможно и не имеет практического значения рассматривать другие ее свойства: качество, эффективность, живучесть, устойчивость, управляемость и т.д., поскольку каждое из перечисленных свойств имеет смысл только в том случае, если обеспечено основополагающее свойство любой машины – ее надежность.

Надежность и безопасность являются прикладными техническими науками, изучающими общие закономерности, которых следуют придерживаться при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации объектов, т.е машин, их узлов, механизмов, деталей и т.д. Они изучают:

- критерии и характеристики надежности и безопасности;
- методы анализа надежности и безопасности технических систем;
- методы синтеза сложных систем по критериям надежности и безопасности;
- методы эксплуатации объектов с учетом их надежности;
- методы испытаний объектов на надежность и безопасность;
- методы повышения надежности и безопасности объектов.

В теории надежности и безопасности исследуются закономерности возникновения отказов объектов, восстановления их работоспособности, рассматривается влияние внешних и внутренних факторов на процессы, происходящие в объектах, разрабатываются методы расчета систем на надежность и безопасность, прогнозирования наступления отказов, изыскиваются способы повышения надежности и безопасности при проектировании и эксплуатации, а также способы сохранения надежности и безопасности при эксплуатации.

Математическим аппаратом науки о надежности и безопасности являются теория вероятности, математическая статистика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, теория информации, математическая логика, теория планирования эксперимента и другие математические дисциплины.

Цель практического курса: изучить методы расчета показателей надежности и безопасности.

В результате изучения курса студенты должны:

Знать:

- основные понятия теории надежности и безопасности;
- методы расчета показателей надежности и безопасности объектов;
- методы расчета систем на надежность и безопасность;
- методы определения показателей надежности и безопасности по результатам испытаний.

Уметь:

- использовать методы расчета надежности и безопасности при решении практических задач исследования технических систем;
- характеристики надежности при расчете показателей эффективности, экономичности и безопасности технических систем.

Владеть:

- о практическими методами расчета и анализа систем на надежность и безопасность;
- о методами обеспечения и повышения надежности объектов в период их эксплуатации.

Работа №1

1. Определение показателей безотказности

1.1 Теоретические основы определения показателей безотказности технических объектов

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 « Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» под надежностью понимают свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность объектов рассматривается как комплексное т.е сложное свойство, состоящее из сочетаний свойств: безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.

Безотказность (ГОСТ 27.002-89) – это свойство объектов сохранять работоспособное состояние в течении определенного времени или наработки.

Безотказность объектов характеризуется следующими единичными показателями:

- вероятность безотказной работы (ВБР);
- средняя наработка до отказа;
- средняя наработка на отказ;
- гамма – процентная наработка до отказа;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов;
- осредненный параметр потока отказов.

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Вероятность безотказной работы объекта P(t) в интервале наработки от 0 до t включительно определяют как

$$P(t) = P\{\tau > t\}, \tag{1.1}$$

где τ – наработка объекта до возникновения отказа.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа:

$$F(t)=1-P(t), \tag{1.2}$$

$$f(t)=\frac{dF(t)}{dt}=\frac{dp(t)}{dt}. \tag{1.3}$$

Наряду с понятием «вероятность безотказной работы» часто используют понятие «вероятность отказа», которое определяется следующим образом: это вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособном в начальный момент времени. Вероятность отказа на отрезке от 0 до t определяют по формуле

$$Q(t)=1-P(t)=F(t). \tag{1.4}$$

Статистические оценки для вероятности безотказной работы $\overline{P}(t)$, вероятности отказа $\overline{Q}(t)$, и функции распределения наработки до отказа $\overline{F}(t)$, даются формулами:

$$\overline{P}(t)=\overline{F}(t)=\frac{n(t)}{N}, \tag{1.5}$$

$$\overline{Q}(t)=\overline{F}(t)=\frac{n(t)}{N}, \tag{1.6}$$

где $n(t)$- число объектов, отказавших на отрезке наработки от 0 до t;

N – число объектов, работоспособных в начальный момент времени.

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

$$T_1=\int_0^\infty t\cdot f(t)dt=\int_0^\infty\left[1-F(t)\right]dt, \tag{1.7}$$

где $f(t)$ - плотность распределения наработки до отказа;

$F(t)$- функция распределения наработки до отказа.

Статистическая оценка для средней наработки до отказа $\overline{T}_1$ дается формулой

$$\overline{T}_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \tau_i, \tag{1.8}$$

где N – число работоспособных объектов при t=0;

τ_i - наработка до первого отказа i-ого объекта.

Средняя наработка на отказ – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течении этой наработки.

$$T = \frac{t}{M\{r(t)\}}, \tag{1.9}$$

где t – суммарная наработка объекта;

$r(t)$ – число отказов, наступивших в течении наработки t;

$M\{r(t)\}$ – математическое ожидание данного числа отказов.

Статистическую оценку средней наработки на отказ $\overline{T}$ вычисляют по формуле

$$\overline{T} = \frac{t}{r(t)}, \tag{1.10}$$

где t – суммарная наработка объекта;

$r(t)$ – число отказов, фактически произошедших за суммарную наработку t.

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

Аналитически она определяется как корень уравнения вида

$$1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t)dt = \frac{\gamma}{100}, \tag{1.11}$$

где $F(t_\gamma)$ – функция распределения наработки до отказа,

$f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа.

Вид формулы, по которой дается статистическая оценка гамма – процентной наработки до отказа, зависит от закона распределения наработки до отказа:

— при законе нормального распределения (ЗНР) наработки до отказа.

$$t_\gamma = \overline{T}_1 - H_k(\gamma) \cdot \sigma, \qquad (1.12)$$

где $\overline{T}_1$ - средняя наработка до отказа;

$H_k(\gamma)$ – квантиль закона нормального распределения (табл.);

σ – среднее квадратическое отклонение наработки до отказа;

— при законе распределения Вейбулла (ЗРВ)

$$t_\gamma = \overline{T}_1 - H_k^B(1-\gamma) \cdot a + t_{см}, \qquad (1.13)$$

где $H_k^B(1-\gamma)$ - квантиль I закона распределения Вейбулла;

a – параметр закона распределения Вейбулла;

$t_{см}$ - величина смещения начала рассеивания наработки до отказа;

— при экспоненциальном законе распределения (ЭЗР) наработки до отказа

$$t_\gamma = Q_\gamma \cdot \overline{T}_1, \qquad (1.14)$$

где Q_γ - коэффициент экспоненциального распределения:

при γ = 0.80-Q_γ=0,233; при γ = 0.95-Q_γ=0,051;

при γ=0.90-Q_γ=0,105; при γ = 0.99-Q_γ =0,010.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ определяют по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} \approx f(t), \qquad (1.15)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки объекта до отказа;

$F(t)$ – функция распределения наработки до отказа.

Статистическая оценка для интенсивности отказов $\overline{\lambda}(t)$ имеет вид

$$\overline{\lambda}(t)=\frac{n(t+\Delta t)-n(t)}{N(t)\cdot\Delta t}=\frac{\Delta n(\Delta t)}{N(t)\cdot\Delta t}, \tag{1.16}$$

Где $\Delta n(\Delta t)$ - число отказов объекта за наработку от $\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)$ до $\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)$;

$N(t)$ – среднее число исправно работающих объектов в рассматриваемом интервале наработки;

Δt - наработка объекта за период наблюдения.

Значение $N(t)$ определяют из выражения

$$N(t)=\frac{N_{i-1}+N_i}{2}, \tag{1.17}$$

где N_{i-1} - число работоспособных объектов в начале интервале наработки Δt ;

N_i - число работоспособных объектов в конце интервала наработки Δt .

Параметр потока отказов – это отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки.

Параметр потока отказов $\mu(t)$ определяют по формуле

$$\mu(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{M\{r(t+\Delta t)-r(t)\}}{\Delta t}, \tag{1.18}$$

где $r(t+\Delta t)$ - число отказов объекта, произошедших за наработку $t+\Delta t$;

$r(t)$– число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки t;

Δt – малый отрезок наработки.

Статистическая оценка параметра потока отказов $\overline{\mu}(t)$ дается формулой

$$\overline{\mu}(t)=\frac{\Delta n(\Delta t)}{N\cdot\Delta t}, \tag{1.19}$$

где $\Delta n(\Delta t)$- общее число отказов восстанавливаемого объекта за интервал наработки от $\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)$ до $\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)$.

Осредненный параметр потока отказов – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки.

Осредненный параметр потока отказов – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки.

Среднесуточный параметр потока отказов определяют по формуле

$$\hat{\mu}(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{M\left\{r(t_2)-r(t_1)\right\}}{t_2-t_1}, \tag{1.20}$$

где $r(t_2), r(t_1)$ – число отказов объекта, произошедших до достижения наработки t_2 и t_1;

t_1, t_2 - наработка объекта, причем $t_2 > t_1$.

Статистическую оценку для осредненного параметра потока отказов $\overline{\mu}(t)$ определяют по формуле

$$\overline{\mu}(t)=\frac{1}{\overline{T}}, \tag{1.21}$$

где $\overline{T}$ - статистическая оценка средней наработки на отказ.

Между показателями безотказности существуют следующие аналитические зависимости:

- зависимость между вероятностью безотказной работы P(t) и средней наработки до отказа T_1

$$T_1=\int_0^{\infty} P(t)\,dt, \tag{1.22}$$

- между вероятностью безотказной работы $P(t)$ и интенсивностью отказов $\lambda(t)$

$$P(t)=e\int_0^{t}\lambda(\tau)\,d\tau, \tag{1.23}$$

- связь между вероятностью безотказной работы, интенсивностью отказов и средней наработкой до отказа

$$T_1 = \int_0^{\infty} \exp\left\{ \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right\} dt, \tag{1.24}$$

для нормального периода эксплуатации $\lambda(t) = const$, поэтому

$$T_1 = \int_0^{\infty} \exp^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}, \tag{1.25}$$

при постоянной интенсивности отказов

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/T_1}, \tag{1.26}$$

При этом плотность вероятности f(t) связана с интенсивностью отказов выражениями

$$f(t) = \lambda(t) \cdot P(t) = \lambda(t) \cdot e^{\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \tag{1.27}$$

- зависимость между плотностью вероятности времени безотказной работы f(t) и параметром потока отказов $\mu(t)$ определяется уравнением Вольтерра

$$\mu(t) = f(t) + \int_0^t \mu(\tau) \cdot f(t-\tau) d\tau, \tag{1.28}$$

Выражение (1.28) показывает, что параметр потока отказов объектов стремится к постоянной величине – обратной средней наработке на отказ, т.е.

$$\lim_{\Delta t \to 0} \mu(t) = \frac{1}{T}, \quad . \tag{1.29}$$

1.2 Примеры определения показателей безотказности

1.2.1 Аналитические методы определения показателей безотказности

Пример 1. Функция распределения наработки элемента электрооборудования автомобиля до отказа имеет вид F(t)=1-$e^{-0{,}000103} * t.$ Определить вероятность того, что за пробег t=100км элемент:1)откажет; 2) не откажет.

В соответствии с выражением (1.4) вероятность отказа элемента объекта

Q(t)=F(t)= 1-$e^{-0{,}000103*100} = 0{,}0102.$

Вероятность того, что элемент электрооборудования откажет в соответствии с (1.2), составит

$$P(t)=1-F(t)=1-(1-e^{-0,000103*100})=0,9897.$$

Пример 2. Вероятность безотказной работы двигателя автомобиля распределена по показательному (экспоненциальному) закону с плотностью f(t)=$0,0068*10^{-3}*e^{-0,0068*10^{-3}}*t$. Определить вероятность того, что двигатель не откажет за пробег t=1000км.

При экспоненциальном законе распределения функция плотности распределения имеет вид

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \qquad (1.30)$$

а функция распределения

$$F(t)=\int_{-\infty}^{t} f(t)dt = \int_{0}^{t} t * e^{-\lambda t}dt = 1 - e^{-\lambda t}, \qquad (1.31)$$

где λ - постоянный параметр ($\lambda > 0$).

Для рассматриваемого примера

$$F(t)=1-e^{-0,0068*10^{3}*t}.$$

В соответствии с выражением (1.2) вероятность безотказной работы

$$P(t)=1-F(t)= e^{-0,0068*10^{3}*1000}=0,9932.$$

Пример 3. Определить количественные характеристики надежности автомобилей: вероятность безотказной работы P(t) среднюю наработку до отказа T_1 и параметр потока отказов для наработки t=5000,10000 и 20000 км пробега при условии, что наработка до отказа подчинена экспоненциальному закону распределения с параметром λ = 0,15*10^{-3} $км^{-1}$.

При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа λ =const и перечисленные выше характеристики безотказности определяют по формулам:

$$\leftarrow P(t) = e^{-\lambda t};\ T_1 = 1/\lambda;\ \mu(t) = \lambda(t) * P(t). \qquad (1.32)$$

Тогда вероятность безотказной работы:

$$P(5000)=e^{-0,15*10^{-3}*500} = e^{-0,75} = 0.4724;$$

$$P\ (10000) = e^{-0,15*10^{-3}*10000} = e^{-1.50}=0.2231;$$

$$\mathrm{P}\ (20000) = e^{-0{,}15*10^{-3}*20000} = e^{-3.00} = 0.0498.$$

Средняя наработка до отказа

$$T_1=1/\lambda=1/(0.15*10^{-3})=6667\ \text{км}$$

Параметр потока отказов:

$$\mu(5000)=0.15*10^{-3}*0.4724=0.07*10^{-3}\text{км}^{-1}\ ;$$

$$\mu(10000)=0.15*10^{-3}*0.2231=0.03*10^{-3}\text{км}^{-1};$$

$$\mu(20000)=0.15*10^{-3}*0.0498=0.007*10^{-3}\text{км}^{-1}.$$

Пример 4. Наработка объекта до отказа подчиняется закону распределения Релея. Требуется вычислить количественные характеристики безотказности: вероятность безотказной работы P(t), параметр потока отказов $\mu(t)$, интенсивность отказов λ(t) и среднюю наработку на отказ $\overline{T}$ для t=1000, 2000 и 3000км, если параметр распределения σ=1000км.

Для закона распределения Релея указанные характеристики определяют по формулам:

$$P(t)=e^{-\frac{t^2}{\sigma^2}};\mu(t)=\frac{t^2}{\sigma^2}\cdot e^{-\frac{t^2}{\sigma^2}};\lambda=\frac{t}{\sigma^2};T=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\cdot\sigma. \qquad (1.33)$$

Для рассматриваемых наработок имеем:

$$\mathrm{P}(1000)=e^{-\frac{1000^2}{2\cdot1000^2}}=e^{-0.5}=0.6065;$$

$$\mathrm{P}(2000)=e^{-\frac{2000^2}{2\cdot000^2}}=e^{-2.0}=0.1353;$$

$$\mathrm{P}(7000)=e^{-\frac{3000^2}{2\cdot000^2}}=e^{-4.5}=0.111.$$

- вероятность безотказной работы

- интенсивность отказов

$$\lambda(1000)=1000/(1000)^2=0.0010\ \text{км}^{-1};$$

$$\lambda(2000)=2000/(1000)^2=0.0020\ \text{км}^{-1};$$

$$\lambda(3000)\text{=}3000/(1000)^2\text{=}0.0030\ \text{км}^{-1};$$

- параметр потока отказов

$$\mu(1000)\text{=}\frac{1000}{1000^2}\text{=}e^{-\frac{(1000)^2}{2*(1000)^2}}\text{=}6.065*10^{-4}\ \text{км}^{-1};$$

$$\mu(2000)\text{=}\frac{2000}{1000^2}\text{=}e^{-\frac{(2000)^2}{2*(1000)^2}}\text{=}2.706*10^{-4}\ \text{км}^{-1};$$

$$\mu(3000)\text{=}\frac{3000}{1000^2}\text{=}-\frac{(3000)^2}{2*(1000)^2}\text{=}3.330*10^{-5}\ \text{км}^{-1}.$$

- средняя наработка объекта до отказа

$$\text{T=}\sqrt{\frac{\pi}{2}}*1000\text{=}1253\text{км.}$$

Пример 5. Средняя наработка до отказа партии двигателей составляет $T_1 = t_{\text{ср}}$=200 тыс.км, а среднее квадратическое отклонение σ=40 тыс.км. Закон распределения наработки до отказа нормальный. Определить показатели безотказности: вероятность безотказной работы P(t), вероятность отказа Q(t), плотность вероятности отказов f(t) и функцию распределения F(t):

$$f(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\cdot e^{-\frac{(t-t_{cp})^2}{2\cdot\sigma^2}}; \qquad (1.34)$$

$$F(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\cdot\int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{(t-t_{cp})^2}{2\cdot\sigma^2}}dt. \qquad (1.35)$$

Расчеты по данным формулам производить удобнее, если осуществить их преобразование к более удобному виду путем замены переменной на другую

$$\text{x= (t - t ср)}/\sigma. \qquad (1.36)$$

Тогда в новых координатах получим:

$$\varphi(\text{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{x^2}{2}}; \qquad (1.37)$$

$$F_{0(x)} = \int_{-\infty}^{x}\varphi(\text{x})dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}*\int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{x^2}{2}}dx. \qquad (1.38)$$

Обе эти функции протабулированы (табл. 1 и 2). При этом для отрицательных аргументов пользуются формулами:

$$\varphi(-x)=\varphi(x); \qquad (1.39)$$

$$F_{0(-x)} = 1 - F_{0(x).} \qquad (1.40)$$

Обратный переход к исходной функции осуществляют по формулам:

$$f(t)=\varphi(x)/\sigma=\frac{1}{\sigma}*y[(t\text{-tср})/\sigma]; \qquad (1.41)$$

$$F(t)= F_{0(x)} = F_0[(t - t\text{ср})/\sigma]. \qquad (1.42)$$

Осуществим замену переменной для t=$t_1 = 250$тыс. км.

$$X=(\ t_1 - t\text{ср})\bar{\sigma} = \frac{250-200}{40} = 1{,}25.$$

По табл. 2 приложения 1 получим

$$Q(t)=F(250)= F_0(1.25) = 0.8944.$$

Поскольку P(t)=1-F(t) имеем

$$P(250)=1\text{- }0.8944 = 0.1056.$$

Значение f(t) определим аналогично по табл.1 приложения

$$f(250)=y(1.25)/40=0.1826/40=0.0046.$$

Интенсивность отказов определим из выражения (1.27)

$$\lambda(t) = f(t)/p(t);$$

$$\lambda(250)=f(250)/p(250)=0.0046/0.1056=0.0436\ \text{км}^{-1}.$$

Для t=t_2=100тыс км получим:

X=(100-200)/40=-2.5; F(100)= $F_0(-2.5) = 1 - F_0(-2.5) = 1 - 0.9938 = 0.0062$; $P(100) = 1 - F(100) = 1 - 0.0062 = 0.9938$; Q(100) = F(100)=0.0062; f(100)=φ(-2.5)/40=0.01753/40=0.00044; $\lambda(100) = f(100)/p(100) = 0.00044/0.9938$ =0.00044.

Для t=t_3=200 тыс.км имеем:

X=(200-200)/40=0; F(200)= $F_0(o)=0.5$; P(200)=1-F(200)=1-0.5=0.5;
Q(200)=F(200)=0.5; f(200)=φ(0)/40=0.3989/40=0.01;
$\lambda(200)$=f(200)/P(200)=0.01/0.05=0.02.

Пример 6. Наработка клинового ремня двигателя подчинена закону распределения Вейбулла с параметрами: a=100тыс.км, b=2. Определить показатели безотказности клинового ремня: вероятность безотказной работы P(t), вероятность отказа Q(t), плотность вероятности отказов f(t) и интенсивность отказов $\lambda(t)$, и средней наработку до отказа T_1, а также характеристики ее рассеивания – дисперсию Д, среднее квадратическое отклонение σ, коэффициент вариации ν при наработке t=40000 км.

При законе распределения Вейбулла плотность вероятности отказа f(t) и функция распределения F(t) имеют вид:

$$f(t)=\frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} * e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}; \tag{1.43}$$

$$F(t)=1-e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \tag{1.44}$$

где a,b – параметры закона распределения Вейбулла.

В соответствии с выражением (1.2) вероятность безотказной работы клинового ремня составит

$$P(t)=e^{-\left(\frac{40}{100}\right)^2}=e^{-(0.5)^2}=0,8521.$$

Вероятность отказа

$$Q(t)=1-e^{-\left(\frac{40}{100}\right)^2}=1-0,8521=0,1479.$$

Плотность вероятности в соответствии с (1.43)

$$F(t)=\frac{2}{100}\cdot\left(\frac{40}{100}\right)^{2-1}\cdot e^{-\left(\frac{40}{100}\right)^2}=0,0068.$$

Интенсивность отказов по формуле (1.27)

$$\lambda(t)=\frac{0,0068}{0,8521}=0,0080км^{-1}.$$

Среднюю наработку до отказа при законе распределения Вейбулла определяют по формуле

$$T_1=a\cdot F\left(1+\frac{1}{в}\right),$$

где $F\left(1+\frac{1}{в}\right)$ – табулированная гамма – функция Г(x) от аргумента, стоящего в скобках (приложения).

$$T_1=100*\Gamma\left(1+\frac{1}{2}\right)=100*\Gamma(1.5)=100*0.8862=88.62 \text{ тыс.км}$$

Дисперсию средней наработки до отказа при законе распределения Вейбулла определяют из выражения

$$Д=a^2\{\Gamma\left(1+\frac{2}{в}\right)-[F(1+\frac{1}{в})]^2\}, \qquad (1.46)$$

$$Д=100^2*\{\Gamma\left(1+\frac{2}{2}\right)-\left[\Gamma\left(1+\frac{1}{2}\right)]^2\right\}=100^2[\Gamma(2)-[F(1.5)]^2\}=100^2*\{1-(0.8862)^2\}=2146 \text{ тыс км}^2.$$

Среднее квадратическое отклонение наработки до отказа

$$\sigma=\sqrt{Д}, \qquad (1.47)$$

$$\sigma=\sqrt{2146}=46.32 \text{ тыс.км.}$$

Коэффициент вариации средней наработки до отказа

$$\nu=\sigma/T_1, \qquad (1.48)$$

$$\nu=46.32/88.62=0.5227.$$

1.2.2. Определение показателей безотказности по результатам испытаний на надежность

Пример 7. В условиях эксплуатации проводили наблюдения за парком из N=400ед. однотипных транспортных средств ТС. В результате было установлено, что в течении пробега t=30000 км отказало n(t)=200ед. Т.С., а в течении следующего за ним интервала наработки $\Delta t = 10000$ км отказы возникли еще у n(Δt)=100 ед.ТС. Требуется определить вероятность безотказной работы $\overline{P}(t)$ при наработке 30000, 40000 и 35000км; параметр потока $\overline{\mu}(t)$ и интенсивностью отказов $\lambda^{-}(t)$ при наработке 3500км.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах определяют по формуле (1.5), по этому:

- для наработки t=30000 км

$$\overline{P}(30000) = 1 - \frac{n(30000)}{N};$$

$$\overline{P}(30000) = 1 - \frac{200}{400} = 0,5.$$

- для наработки t+$\Delta t = 40000$км

$$\overline{P}(40000) = 1 - \frac{n(40000)}{N};$$

$$\overline{P}(30000) = 1 - \frac{300}{400} = 0,25.$$

Среднее число исправно работавших ТС в интервале наработки t=35000км

$$\text{N}(3500)=\text{N}-N^{-}(t);$$

$$\text{n}(3500)=400-150=250 \text{ ед.}$$

Вероятность безотказной работы ТС в течении наработки t=3500км составит

$$\overline{P}(35000) = 1 - \frac{n(35000)}{N};$$

$$\overline{P}(35000) = 1 - \frac{250}{400} = 0,375.$$

Параметр потока отказов в продолжении наработки $\Delta t = 3500$км по формуле (1.19) составит

$$\bar{\mu}(3500) = \frac{100}{400 \cdot 10000} = 2{,}5 \cdot 10^{-5} км^{-1}.$$

Интенсивность отказов в течении той же наработки по формуле (1.16)

$$\bar{\lambda}(3500) = \frac{100}{150 \cdot 1000} = 6{,}7 \cdot 10^{-5} км^{-1}.$$

Пример 8. Проводились наблюдения за тремя ТС, наработка которых составила соответственно: 1-25000км, 2- 35000км, 3- 20000км. В процессе наблюдений у ТС было зафиксировано следующее количество отказов: 1-4, 2-10 и 3-6 отказов. Определить среднюю наработку данной группы ТС на отказ.

Общий пробег группы из N транспортных средств за период наблюдения составил

$$\sum_{i=1}^{N} t = 2500 + 3500 + 20000 = 80000\text{км}.$$

За этот пробег было зафиксировано общее количество отказов

$$\sum_{i=1}^{N} r(t) = 4 + 10 + 6 = 20 \text{ отказов}.$$

Средняя наработка данной группы ТС на отказ по формуле (1.10) составит

$$\bar{T} = \frac{80000}{20} = 4000 км.$$

Пример 9. Определить 80% наработку ТС до отказа при условии, что теоретический закон распределения наработки до первого отказа известен, а его параметры составляют:

а) закон нормального распределения:

$$\bar{T} = 4050 км; \sigma = 925 км,$$

б) закон распределения Вейбулла:

$$\overline{T} = 2960км; a = 1820км; b = 1{,}19км; t_{см} = 1300км, ;$$

в) экспоненциальный закон распределения:

$$\overline{T} = 5000км; \lambda = 0{,}015.$$

При законе нормального распределения гамма - процентная наработка объекта до отказа определяется по формуле (1.12). Квантиль закона нормального распределения $H_к(\gamma)$ при γ=0.8 (табл. 8, приложение1) составляет $H_к(0.8)$=0.842. Тогда по формуле (1.12) получим

$$\overline{T}(80\%) = 4050 - 0{,}842 \cdot 925 = 3271км.$$

При законе распределения Вейбулла гамма - процентную наработку до отказа определяют по формуле (1.13). Квантиль закона распределения Вейбулла $H_к^{в}(1-\gamma)$ при γ=0.8. (Табл. 9 Приложение 1) составляет $H_к^{в}$(1-0.8)= $H_к^{в}$(0.2)=0.29. Тогда по формуле (1.13) получим

с

При экспоненциальном законе распределения гамма-процентную наработку до отказа определяют по формуле (1.14) при коэффициенте $Q_\gamma = 0{,}233$.

$$\overline{T}_1(80\%) = 0{,}233 \cdot 3000 = 1165км.$$

1.3. Задание к работе№1

Наработка объекта до отказа подчинена экспоненциальному закону распределения с параметрами λ=А. Определить показатели безотказности: вероятность безотказной работы P(t), вероятность отказа Q(t), среднюю да до отказа T_1, параметр потока отказов $\mu(t)$, а также вычислить значение дисперсии Д, среднего квадратического отклонения σ, и коэффициент вариации ν средней наработки до отказа, функции плотности вероятности f(t), и функции распределения F(t) при наработке t=Вкм. Варианты индивидуальных заданий приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные к заданию 1

Номер варианта	Значение показателей		Номер варианта	Значение поазателей	
	А, $км^{-1}$	В, км		А, $км^{-1}$	В, км
1	-0,0001	350	11	-0,0002	200
2	-0,0015	150	12	-0,0011	180
3	-0,0076	200	13	-0,0019	300
4	-0,0071	500	14	-0,0053	250
5	-0,0062	600	15	-0,0069	360
6	-0,0056	700	16	-0,0073	400
7	-0,0047	850	17	-0,0082	250
8	-0,0039	900	18	-0,0111	120
9	-0,1402	100	19	-0,0109	160
10	-0,701	150	20	-0,0610	80

Примечание: при экспоненциальном законе распределения случайной величины ее дисперсию определяют по формуле: Д=$1/\lambda^2$.

1.3.2. Задание 2

Определить показатели безотказности: P(t), Q(t), $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ для наработок: t_1=c, t_2=E, t_3=G. При условии, что закон распределения наработок до отказа известен, а его параметры составляют:

- экспоненциальный закон (ЭЗР) при $\lambda = 0.005$ $км^{-1}$;
- закон нормального распределения (ЗНР) $\overline{t_1} = t_{ср} = 180$ тыс.км, $\sigma = 50$ тыс. км;
- закон распределения Вейбулла (ЗРВ), а=120 тыс.км, в=1.85;
- закон распределения Релея (ЗРР) при $\sigma = 0,8$ тыс.км.

Таблица 1.2

Исходные данные к заданию 2

Номер варианта	Закон распределения	Значения показателей тыс. км			Номер варианта	Закон распределения	Значения показателей, тыс. км		
		C	E	G			C	E	G
1	ЭЗР	0,50	0,75	0,105	11	ЗРВ	100,0	150,0	450,0
2	ЗНР	45	600	85	12	ЗРР	1,3	2,4	3,3
3	ЗРВ	3,5	5,0	7,5	13	ЭЗР	0,25	0,35	0,55
4	ЗРР	1,8	2,20	3,60	14	ЗНР	160,0	210,0	300,0
5	ЭЗР	0,60	0,80	1,00	15	ЗРВ	5,5	10,5	15,0
6	ЗНР	8,00	16,00	22,00	16	ЗРР	1,6	2,5	2,9
7	ЗРВ	0,900	1,80	3,60	17	ЭЗР	0,20	0,40	0,90
8	ЗРР	2,3	4,6	5,0	18	ЗНР	10,0	50,0	36,0
9	ЭЗР	0,15	0,45	0,70	19	ЗНВ	12,0	24,0	36,0
10	ЗНР	35,0	70,0	200,0	20	ЗРР	1,7	2,0	3,0

1.3.3. Задание 3

Испытания группы из N=A автомобилей показали, что за пробег t=Bкм отказало n(t)=c автомобилей, а в течение следующего за ним периода наработки Δt=Дк отказы возникли еще у n(Δt)=E автомобилей. Определить вероятность безотказной работы $\overline{P}(t)$, параметр потока отказов $\overline{\mu}(t)$ и интенсивность отказов $\overline{\lambda}(t)$ при наработке $G_{км}$. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл.1.3

Таблица 1.3

Исходные данные к заданию 3

Номер варианта	А, ед	С, ед	Е, ед	В, тыс. км	Д, тыс. км	G, тыс км	Номер варианта	А, ед	С, ед	Е,ед	В, тыс. км	Д, тыс. км	G, тыс км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	500	250	50	50	20	60	11	50	5	5	20	20	30
2	600	150	20	70	30	85	12	75	15	10	40	10	45
3	700	100	30	60	10	65	13	95	20	15	50	20	60
4	800	50	25	30	10	35	14	100	25	5	60	10	65
5	900	30	10	40	20	50	15	150	50	10	70	20	80
6	350	200	100	55	30	70	16	200	100	20	100	30	115
7	400	160	60	65	35	80	17	250	75	15	60	30	75
8	450	120	30	75	40	95	18	300	100	20	70	20	80
9	550	110	25	20	10	25	19	350	150	50	80	10	85
10	650	65	35	80	30	95	20	50	10	15	90	20	100

1.3.4. Задание 4

Определить гамма процентную наработку автомобилей до отказа t(r) при известном законе распределения наработки F, и параметрах этих законов, приведенных в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Исходные данные к заданию 4

Номер варианта	γ ,%	$\overline{T}_1$ тыс. км	σ, тыс. км	a, тыс. км	b	$t_{см}$, тыс. км	λ	Вид закона
1	80	100	25	-	-	-	-	ЗНР
2	85	90	-	35	1.3	10	-	ЗРВ
3	90	85	-	-	-	-	0,001	ЭЗР
4	95	80	20	-	-	-	-	ЗНР
5	99	75	-	40	2.5	15	-	ЗРВ
6	80	70	-	-	-	-	0,003	ЭЗР

Номер варианта	γ ,%	$\overline{T_1}$ тыс. км	σ , тыс. км	a, тыс. км	b	$t_{см}$, тыс. км	λ	Вид закона
7	90	65	15	-	-	-	-	ЗНР
8	80	120	-	50	3.0	2.0	-	ЗРВ
9	85	110	-	-	-	-	0,002	ЭЗР
10	99	115	30	-	-	-	-	ЗНР

1.4. Контрольные вопросы к работе 1

1. Приведите определение понятия «надежность».
2. Из каких составляющих состоит свойство «надежность».
3. Дайте определение безотказности.
4. Перечислите единичные показатели безотказности.
5. Приведите определение вероятности безотказной работы и вероятности отказа.
6. В чем отличие параметра потока отказов и интенсивности отказов?
7. В чем отличие средней наработки до отказа и наработки на отказ?
8. В каких случаях используют показатель « осредненный параметр потока отказов»?
9. Какие аналитические зависимости существуют между показателями безотказности?
10. Дайте определение закона распределения случайной величины, функции распределения и плотности распределения случайной величины.

Работа №2

2.Определение показателей долговечности

2.1. Теоретически основы определения показателей долговечности технических объектов

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Долговечность объектов характеризуется ресурсами и сроками службы.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до перехода в предельное состояние.

Различают: доремонтный (до первого капитального ремонта), межремонтный (между капитальными ремонтами) и полный (до списания), а также назначенный и остаточный ресурсы.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должны быть прекращена независимо от его технического состояния.

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после капитального ремонта до перехода в предельное состояние.

Подобно ресурсу, различают: доремонтный (срок службы до первого капитального ремонта), межремонтный (срок службы между капитальными ремонтами) и полный (срок службы до списания), а также назначенный срок службы (до капитального ремонта).

Кроме перечисленных на практике используют также понятия как гарантийный ресурс и гарантийный срок службы (срок гарантии).

Гарантийный ресурс – наработка объекта, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнения определенных требований к объекту при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации.

Аналогично определяются и термин гарантийный срок службы – календарный период, в течение которого изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнения определенных требований к объекту при условий соблюдения потребителям правил эксплуатации.

Долговечность характеризуется следующими единичными показателями:

- Средний ресурс;
- Гамма-процентный ресурс;
- Средний срок службы;
- Гамма-працентный срок службы;

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса. Средний ресурс определяют аналитически по формуле

$$\mathrm{T} = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty [1 - F(t)] dt, \quad (2.1)$$

где f(t) – плотность распределения ресурса;

F(t) – функция распределения ресурса;

Статическая оценка среднего ресурса дается формулой

$$\overline{T} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^{N} \tau_j, \quad (2.2)$$

где N – число наблюдаемых объектов;

$\tau_j -$ ресурс j – го объекта.

Гамма – процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ, выраженной в процентах.

Аналитически гамма-працентный ресурс определяется по формуле идентичной (1.11)

$$F\left(t_\gamma\right) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad (2.3)$$

где $F\left(t_\gamma\right)$ - функция распределения ресурса;

γ – заданный уровень вероятности.

Вид формулы, по которой дается статическая оценка гамма-процентного ресурса, зависит от закона распределения ресурса формулы (1.12)-(1.14):

- при законе нормального распределения

$$\overline{T}(\gamma) = \overline{T} - H_k(\gamma) \cdot \sigma, \quad (2.4)$$

где $\overline{T}$ – средний ресурс объекта;

σ – среднее квадратическое отклонение ресурса;

— при законе распределения Вейбула

$$\overline{T}(\gamma) = H_K^B(1-\gamma) \cdot a + t_{см}, \quad (2.5)$$

где t_{cm} - величина смещения начала рассеивания ресурса;

— при экспоненциальном законе распределения ресурса

$$\overline{T}(\gamma) = Q_\gamma \cdot \overline{T}. \quad (2.6)$$

Средний срок службы - математическое ожидание срока службы.

Аналитическое определение и статическая оценка среднего срока службы осуществляется соответственно по формулам (2.1) и (2.2), если в них осуществить замену термина «ресурс» на «срок службы».

Гамма – процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Его аналитическое определение и статическая оценка осуществляется по формулам (2.3) - (2.6) при замене термина «ресурс» на «срок службы».

2.2. Примеры определения показателей долговечности

2.2.1. Аналитические методы определения показателей долговечности объектов

Пример 1. Определить средний и 80% доремонтные ресурсы партии автомобильных двигателей, если известно, что закон распределения ресурса экспоненциальный с параметром $\lambda = 0{,}01$ тыс. км$^{-1}$.

При экспоненциальном законе распределения ресурса величину среднего ресурса определяют из выражения (2.1), которое с учетом (1.25) и (1.26) можно записать в следующем виде

$$\mathrm{T} = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t}dt = 1/\lambda.$$

После подстановки параметра λ в полученное выражение имеем

$$\bar{T} = \frac{1}{0{,}01} = 100 \text{ тыс. км} = 10^5 \text{км}.$$

Значение гамма-процентного ресурса партии двигателей по формуле (2.3) с учетом (1.2) и (1.26) составит

$$1 - e^{-\lambda t} = 1 - \frac{\gamma}{100},$$

или

$$e^{-\lambda t} = \frac{\gamma}{100}.$$

После логарифмирования получим

$$-\lambda t = \ln(\gamma/100)$$

или

$$t = T(\gamma) = \frac{\ln(\gamma/100)}{-\lambda} = \frac{\ln(0{,}8)}{-0{,}01} = 22{,}3 \text{ тыс. км}.$$

Пример 2. Определить средний и 90% доремонтный срок службы автомобилей при условии, что закон распределения срока службы известен, а его параметры составляют:

1) закон распределения Релея – σ =8,4 года;

2) закон распределения Вейбулла – a= 6,2 года; b= 2.

При законе распределения Релея величину среднего срока службы определяют по формуле (1.33)

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma,$$

$$T = \sqrt{\frac{3.14}{2}} \cdot 8{,}4 = 10{,}5.$$

Гамма-процентный срок службы с учетом выражений (1.2) и (1.33)

$$P(T_\gamma) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} = \frac{\gamma}{100}.$$

После логарифмирования получим

$$-\frac{t^2}{2\sigma^2} = In\left(\frac{\gamma}{100}\right),$$

$$t = \sqrt{\left(-2\sigma^2\right) \cdot In\left(\frac{\gamma}{100}\right)},$$

$$T(\gamma) = t = \sqrt{\left(-2 \cdot 8{,}4^2\right) \cdot In\left(\frac{90}{100}\right)} = 3{,}85 \textit{года}.$$

При законе распределения Вейбулла среднее значение срока службы определяют по формуле (1.45)

$$T = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right).$$

После подстановки получим

$$\text{Т}= 6{,}2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right) = 6{,}2 \cdot \Gamma(1{,}5) = 6{,}2 \cdot 0{,}8862 = 5{,}49 \text{ года}.$$

Гамма-працентный срок службы при законе распределения Вейбулла определяют из выражения (2.3) с учетом (1.44)

$$F\left(T_\gamma\right) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} = 1 - \frac{\gamma}{100}.$$

$$e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} = \frac{\gamma}{100}.$$

Пусть $\left(\frac{t}{a}\right)^b = \alpha$, тогда

$$e^{-\alpha} = \frac{\gamma}{100}.$$

После логарифмирования получим

$$-\alpha = In\left(\frac{\gamma}{100}\right),$$

$$-\alpha = In\left(\frac{90}{100}\right) = -0{,}105,$$

$$\alpha = 0{,}105.$$

С учетом принятых ранее обозначений

$$\alpha = \left(\frac{t}{a}\right)^{b} = 0{,}105,$$

$$\frac{t}{a} = \sqrt[b]{0{,}105},$$

$$T(\gamma) = t = a \cdot \sqrt[b]{0{,}105} = 6{,}2 \cdot \sqrt{0{,}105} = 2{,}01 \textit{года}.$$

2.2.2. Определение показателей долговечности по результатам испытаний.

Пример 3. Определить средний межремонтный ресурс и его среднее квадратическое отклонение по результатам наблюдений за группой из трех автомобилей, межремонтные ресурсы которых составили: $\tau_1 = 160$ тыс. км, $\tau_2 = 185$ тыс. км и $\tau_3 = 225$ тыс. км.

Средний межремонтный ресурс данной группы автомобилей по формуле (2.2) составит

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^{3} \tau_j,$$

$$\bar{T} = \frac{1}{3} \cdot (160 + 185 + 225) = 190 \text{ тыс. км.}$$

Среднее квадратическое отклонение межремонтного ресурса

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N} \left(\tau_j - \bar{T}\right)}{N-1}},$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(160-190)^2 + (185-190)^2 + (225-190)^2}{3-1}} = 32{,}8 \text{тыс.км.}$$

Пример 4. Определить 80% доремонтный ресурс группы автомобильных двигателей, если известно, что закон распределения ресурсов:

1) нормальный - с параметрами $\bar{\mathrm{T}} = 90$тыс. км и $\sigma = 18$ тыс. км;

2) Вейбулла – с параметрами $\overline{\mathrm{T}} = 90$тыс.км, a= 89,8 тыс.км, b = 1,72, $t_{см}$ = 10 тыс.км.

При нормальном законе распределении ресурса величину γ - процентного ресурса подсчитывают по формуле (2.4)

$$\overline{T}(\gamma) = \overline{T} - H_k(\gamma)\cdot\sigma.$$

При γ= 0,8 значение $H_k(\gamma) = H_k(0{,}8) = 0{,}842$ (табл. ?), тогда

$$\overline{T}(80) = 90 - 0{,}842\cdot 18 = 74{,}8 \text{тыс.км.}$$

При законе распределения Вейбулла величину γ - процентного ресурса подсчитывают по формуле (2.5)

$$\overline{T}(\gamma) = H_k(1-\gamma)\cdot a + t_{см}.$$

При γ= 0,8 значение $H_k(1-\gamma) = H_k(1-0{,}8) = H_k(0{,}2)$=0,41 (табл. ?), тогда

$$\overline{T}(80) = 0{,}41\cdot 89{,}8 + 10 = 37{,}8 \text{тыс.км.}$$

Пример 5. Определить гарантийный ресурс автомобиля при следующих исходных данных:

— закон распределения доремонтного ресурса – нормальный с параметрами $\overline{\mathrm{T}} = 200$ тыс. км, $\sigma = 50$тыс. км;

— заданный производителем процент автомобилей, выходящих из строя до достижения гарантийного ресурса не должен превышать 5%.

Одновременно определить величину удорожания выпускаемой партии автомобилей при условии, что их выпуск составил 100000 ед. по цене 600 тыс. руб./ед. (автомобили заменяют автовладельцам на новые).

Поскольку по условию процент автомобилей, выходящих из строя до достижения гарантийного ресурса составляет 5%, то требуется определить их 95% - ный гарантийный ресурс. Его величину при ЗНР ресурса по формуле (2.4) составляет

$$\overline{T}(\gamma) = \overline{T} - H_k(\gamma)\cdot\sigma.$$

$$\overline{T}(95\%) = 200 - H_k(0{,}95)\cdot 50.$$

При γ= 0,95 значение $H_K(0{,}95) = 1{,}645$ (табл. ?).

Тогда

$$\bar{T}(95\%) = 200 - 1{,}645 \cdot 50 = 117{,}75 \text{ тыс. км.}$$

Или

$$\bar{T}(95\%) \approx 120 \text{ тыс. руб.}$$

Поскольку 5% автомобилей заменяются на новые, то их общая вероятная цена составит

$$100000 \cdot 0{,}05 \cdot 600000 = 3 \cdot 10^9 \text{руб.}$$

Удорожание оставшихся автомобилей составит

$$\Delta Ц = \frac{3 \cdot 10^9}{95000} = 31579 \text{ руб.}$$

Минимальная цена одного автомобиля

Ц= 600+31,6= 631,6 тыс. руб.

2.3. задание к работе №2

2.3.1. Задание 1.

Определить средний и гамма-процентный доремонтные ресурсы партии коробок передач автомобилей при известном законе распределения ресурса и его параметрах, приведенных в табл 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные к заданию 1

Номер варианта	закон	γ,%	Параметры				Номер варианта	Закон	γ,%	Параметры			
			λ, тыс.км$^{-1}$	σ, тыс. км	a, тыс. км	b				λ, тыс.км$^{-1}$	σ, тыс. км	a, тыс. км	b
1	ЭЗР	85	0,015	-	-	-	11	ЭЗР	99.9	0,007	-	-	-
2	ЗЗР	80	-	100	-	-	12	ЗЗР	95	-	50	-	-
3	ЭЗР	90	0,020	-	-	-	13	ЗРВ	80	-	-	20	1,
4	ЗРВ	95	-	-	15	1,8	14	ЭЗР	80	0,03	-	-	-
5	ЗРВ	99.5	-	-	60	2,2	15	ЗЗР	99	-	60	-	-
6	ЭЗР	95	0,025	-	-	-	16	ЗРВ	90	-	-	35	1,
7	ЗЗР	85	-	90	-	-	17	ЭЗР	85	0,018	-	-	-

8	ЭЗР	95	0,009	-	-	-	18	ЗЗР	80	-	70	-	-
9	ЗРВ	85	-	-	50	3,0	19	ЗРВ	99	-	-	70	2,
10	ЗЗР	90	-	80	-	-	20	ЭЗР	99	0,022	-	-	-

2.3.2. Задание 2

Определить γ - процентный доремонтный ресурс для группы ведущих мостов автомобилей, если известны законы распределения ресурса и их параметры (табл 2.2).

Таблица 2.2

Исходные данные к заданию 2

Номер варианта	Закон	r,%	Параметры закона распределения				
			$\overline{T}$,тыс.км	σ, тыс.км	a, тыс.км	$t_{см}$, тыс. км	в
1	ЭЗР	80	200	-	-	-	-
2	ЗНР	80	250	30	-	-	-
3	ЗРВ	80	80	-	75	10	1,6
4	ЭЗР	90	250	-	-	-	-
5	ЗНР	90	200	40	-	-	-
6	ЗРВ	85	100	-	90	15	1,8
7	ЭЗР	95	200	-	-	-	-
8	ЗНР	95	180	25	-	-	-
9	ЗРВ	90	150	-	120	20	2,0
10	ЭЗР	99	180	-	-	-	-
11	ЗНР	99	160	20	-	-	-
12	ЗРВ	95	190	-	170	25	2,2
13	ЭЗР	80	160	-	-	-	-
14	ЗНР	85	100	15	-	-	-
15	ЗРВ	99	250	-	210	30	2,5
16	ЭЗР	90	260	-	-	-	-
17	ЗНР	90	300	70	-	-	-
18	ЗРВ	85	200	-	160	40	2,9
19	ЭЗР	95	220	-	-	-	-
20	ЗНР	95	140	15	-	-	-

2.4. Контрольные вопросы к работе 2

1. Дайте определение свойству «долговечность».
2. Что такое «ресурс» и «срок службы»?
3. Какие виды ресурсов и сроков службы принято различать?
4. Какими единичными показателями характеризуется долговечность?
5. Дайте определения показателям «средний ресурс» и «гамма-процентный ресурс».
6. Приведите определения «среднего срока службы» и «гамма-процентного срока службы».
7. Назовите единицы измерения ресурса и срока службы.
8. Как вы понимаете смысл понятия «предельное состояние»?
9. Чем характеризуется предельное состояние объекта ?
10. Как связаны между собой понятия «долговечность» и «работоспособность»?

Работа №3

3. Определение показателей ремонтопригодности

3.1. Теоретические основы определения показателей ремонтопригодности технических объектов

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Термин «ремонтопригодность» эквивалентен международному термину «приспособленность к поддержанию работоспособного состояния» и трактуется как приспособленность объекта к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, а также причин их вызывающих («контролепригодность»), приспособленность к техническому обслуживанию («обслуживаемость») и приспособленность к ремонту («ремонтопригодность в узком смысле»).

Ремонтопригодность автомобилей характеризуется следующей группой единичных показателей:

- вероятность восстановления;
- гамма - процентное время восстановления;
- среднее время восстановления;
- интенсивность восстановления;
- средняя трудоемкость восстановления.

Вероятность восстановления – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение.

Если θ заданное время восстановления, то аналитическое выражение для определения вероятности восстановления выглядит следующим образом

$$P_в(t)=P\{\theta < t\}. \quad (3.1)$$

При этом $P_в(t)$ представляет собой интегральную функцию распределения случайной величины θ.

По результатам статистических наблюдений за процессом восстановления партии из N объектов вероятность восстановления определяют по формуле

$$\overline{P_в}(t)=1-\frac{n(t)}{N}. \quad (3.2)$$

где $n(t)$ – число объектов, время восстановления работоспособного состояния которых превзошло заданное.

По аналогии с вероятностью отказа может быть определена и вероятность восстановления на заданном интервале времени t, т.е. вероятность того, что $\theta > t$

$$\overline{Q_в}(t) = P_в\{t \le \theta\} = 1 - P_в(t). \tag{3.3}$$

По статистическим данным вероятность восстановления определяют по формуле

$$\overline{Q_в}(t) = \frac{n(t)}{N}. \tag{3.4}$$

Плотность вероятности момента восстановления определяют определяется из выражения

$$f_в(t) = \frac{dP_в(t)}{dt}. \tag{3.5}$$

Гамма – процентное время восстановления – время, в течении которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью r, выражающий в процентах.

Гамма – процентное время восстановления определяется из уравнения

$$1 - F_в(T_\gamma) = 1 - \int\limits_0^{T_\gamma} f_в(t)dt = \gamma/100. \tag{3.6}$$

где $F_в(T_r)$ - функция распределения времени восстановления работоспособного объекта.

Вид выражения для определения гамма – процентного времени восстановления работоспособности объекта по статистическим данным зависит от закона распределения времени восстановления:

– при законе нормального распределения определяется по формуле аналогичной (1.12)

$$\overline{t_в}(\gamma) = \overline{T_в} - H_k(\gamma) \cdot \sigma_в. \tag{3.7}$$

где $\overline{T_в}$ - статистическая оценка среднего времени восстановления работоспособного состояния объекта;

$\sigma_в$ - среднее квадратическое отклонение времени восстановления работоспособного объекта,

- при законе распределения Вейбулла по формуле аналогичной (1.13)

$$\overline{t_в}(\gamma) = H_k^B(1-\gamma) \cdot a + t_{см}, \tag{3.8}$$

где $t_{см}$ – величина смещения начала рассеивания времени восстановления объекта.

- при экспоненциальном законе распределения по формуле аналогичной (1.14)

$$\overline{t_в}(\gamma) = Q_\gamma \cdot \overline{T_B}. \tag{3.9}$$

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа.

Аналитическое выражения для определения среднего времени восстановления аналогично выражению (1.7)

$$T_в = \int_0^\infty t \cdot f_в(t) dt = \int_0^\infty \left[1 - F_B(t)\right] dt. \tag{3.10}$$

Статистическая оценка для среднего времени восстановления дается по формуле, аналогичной (1.8)

$$\overline{T}_в = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^{N} \tau_{вj}. \tag{3.11}$$

где $\tau_{вi}$ - время восстановления i-ого объекта.

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановления не было завершено.

Аналитическое выражения для определения интенсивности восстановления имеет вид

$$\mu_в(t) = \frac{f_в(t)}{P_в(t)}, \tag{3.12}$$

Или

$$P_в(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu_в(\tau) d\tau}. \tag{3.13}$$

Статистическую оценку интенсивности восстановления определяют по формуле

$$\overline{\mu}_в(t) = \frac{n_в(t+\Delta t) - n_в(t)}{N(t)\cdot \Delta t}, \tag{3.14}$$

где $n_в(t + \Delta t)$ - число объектов, восстановление которых произошло на интервале времени от 0 до $t + \Delta t$;

$N(t)$ – среднее число объектов, восстановление которых не произошло к моменту времени t.

$n_в(t)$ – число объектов восстанавливаемых на интервале времени от 0 до t;

N – число наблюдаемых объектов восстановления

Δt -малый промежуток времени.

Средняя трудоемкость восстановления – математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

Аналитическое $\tau_в$ и статистическое $\tau_в^-$ определение средней трудоемкости восстановления осуществляется по формулам (3.10) – (3.11) при условии замены словосочетания « время восстановления» на « трудоемкость восстановления».

3.2. Примеры определения показателей ремонтопригодности

3.2.1. Аналитические методы определения показателей ремонтопригодности

Пример 1. Определить вероятность восстановления $P_в(t)$, гамма процентное время восстановления $T_в(80\%)$, среднее время восстановления $T_в$ и интенсивность восстановления $\mu_в(t)$ для $t_в = 2.0ч$ *при условии*:

1) время восстановления подчинено экспоненциальному закону с параметром $\lambda = 0.75ч^{-1}$;

2) время восстановления подчинено закону распределения Релея с параметром $\sigma_в = 0.7ч$;

3) время восстановления подчинено закону распределения Вейбулла с параметрами – а=1.8ч, в=3.0 ч;

4) время восстановления подчинено нормальному закону с параметрами – tср=2.3ч, $\sigma_в$=0.2ч.

В соответствии с (1.32) при экспоненциальном законе распределения времени восстановления $\lambda = \mu_в$=$0.75ч^{-1}$.

Аналогично при $\lambda = const$ выражение (3.13) примет вид

$$P_в(t) = e^{-\mu_в \cdot t_в}. \tag{3.15}$$

После установки значений $\mu_в$ и $t_в$ получим

$$P_в(t) = e^{-0,75 \cdot 2} = 0,22.$$

Согласно (1.32)

$$T_в(t) = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\mu_в}, \tag{3.16}$$

Тогда

$$T_в(t) = 1/0,75 = 1,33ч.$$

Из выражений (3.6) и (1.2) получим

$$1 - F_в\left(T_\gamma\right) = P_в\left(T_\gamma\right) = \frac{\gamma}{100}.$$

Согласно 3.15 имеем

$$e^{-\mu_в \cdot t} = \frac{\gamma}{100}. \tag{3.17}$$

После логарифмировании получим

$$-\mu_в \cdot t = In\left(0,01 \cdot \gamma\right).$$

При γ=0,8 имеем

$$-\mu_в \cdot t = 0,22.$$

Откуда

$$t = T_\gamma = 0,22/\mu_в = 0,22/0,75 = 0,29ч.$$

При законе Релея интенсивность восстановления согласно (1.33) составит

$$\lambda = \mu_в = t_в \Big/ \sigma_в^2, \tag{3.18}$$

Откуда

$$\mu_в = 2/\left(0,7\right)^2 = 4,08ч^{-1}.$$

Среднее время восстановления согласно (1.33)

$$T_в = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma_в., \tag{3.19}$$

Или

$$T_в = \sqrt{\frac{3,14}{2}} \cdot 0,7 = 0,87ч.$$

Вероятность восстановления по формуле (1.33)

$$P_в\left(t\right) = e^{-\frac{t_в^2}{2\sigma_в^2}}. \tag{3.20}$$

Для $t_в = 2ч$, получим

$$P_{в}(t)=e^{-\frac{2^2}{2\cdot 0{,}7^2}}=e^{-4{,}08}=0{,}02.$$

Гамма – процентное время восстановления согласно (1.11) и (1.2) определяют как корень уравнения

$$P_{в}(t)=e^{-\frac{t_{в}^2}{2\sigma_{в}^2}}=\frac{\gamma}{100}.$$

После логарифмирования получим

$$-\frac{t_{в}^2}{2\sigma_{в}^2}=In(0{,}01\cdot\gamma). \qquad (3.21)$$

Решая полученное уравнение относительно $t_{в}$, получим

$$T_{в}(\gamma)=t_{в}=\sqrt{-In(0{,}01\cdot\gamma)\cdot 2\cdot\sigma_{в}^2},$$

или

$$T_{в}(\gamma)=\sqrt{0{,}22\cdot 2\cdot 0{,}7^2}=0{,}46ч.$$

При законе распределения Вейбулла в соответствии с (1.44) и (1.2) вероятность восстановления определяется из выражения

$$P_{в}(t)=e^{-\left(\frac{t_{в}}{a}\right)^{в}}. \qquad (3.22)$$

После подстановки значений получим

$$P_{в}(t)=e^{-\left(\frac{2}{1{,}8}\right)^{3}}.$$

Плотность вероятности времени восстановления согласно (1.43) составит

$$f_в(t)=\frac{b}{a}\left(\frac{t_в}{a}\right)^{в-1}\cdot e^{-\left(\frac{t_в}{a}\right)^в}. \qquad (3.23)$$

После подстановки значений получим

$$f_в(t)=\left(\frac{3,0}{1,8}\right)\cdot\left(\frac{2}{1,8}\right)^{3-1}\cdot e^{-\left(\frac{2}{1,8}\right)^3}=0,51.$$

Интенсивность восстановления по формуле (3.12) составит

$$\mu_в(t)=f_в(t)/P_в(t), \qquad (3.24)$$

или

$$\mu_в(t)=0,51/0,25=2,04ч^{-1}.$$

Среднее время восстановления при законе распределения Вейбулла по формуле (1.45) составит

$$T_в=1,8\cdot Г\left(1+\frac{1}{3}\right)=1,80\cdot Г(1,33).$$

По данным табл. 4 приложения 1 значение Г(1.33)=0,8934.

$$T_в=1,8\cdot 0,8934=1,61ч.$$

Гамма – процентное время восстановления согласно (1.44) и (3.6) определяется из выражения

$$e^{-\left(\frac{t_в}{a}\right)^в}=\frac{\gamma}{100}. \qquad (3.25)$$

Пусть $\left(\frac{t_в}{a}\right)^в=\lambda$, тогда выражение (3.25) примет вид

$$e^{-\alpha}=0,01\cdot\gamma.$$

После логарифмирования получим

$$-\alpha = In\left(0,01 \cdot \gamma\right).$$

При γ=80% значение $\ln(0.01 * 80)$= - 0.22 откуда $\alpha = 0.22$

С учетом принятых обозначений

$$\left(\frac{t_в}{a}\right)^в = 0,22.$$

откуда $\left(\frac{t}{a}\right)^в = \sqrt[в]{0,22},$

и

$$T\left(\gamma\right) = t = a \cdot \sqrt[в]{0,22},$$

Или

$$T\left(\gamma\right) = 1,8 \cdot \sqrt[3]{0,22},$$

При законе нормального распределения среднее время восстановления составляет

$$T_в = t_{cp} = 2,3ч.$$

Вероятность восстановления $P_в(t)$ для $t_в = 2ч$ ч определим осуществив замену переменной с учетом (1.36)

$$X = \frac{t_в - t_{cp}}{\sigma_в}, \tag{3.26}$$

или

$$X = \frac{2 - 2,3}{0,2} = -1,5.$$

С учетом свойства (1.40) имеем

$$F_O(-x) = 1 - F_O(x), \quad (3.27)$$

Или

$$1 - F_O(1{,}5) = 1 - 0{,}93 = 0{,}07.$$

С учетом выражений (1.42) и (1.2) имеем

$$P_в(t) = 1 - F_в(t), \quad (3.28)$$

или

$$P_в(t) = 1 - 0.07 = 0.93.$$

Плотность вероятности времени восстановления с учетом выражения (1.41) составит

$$f_в(t) = \frac{1}{\sigma_в} \cdot \varphi\left[\frac{t_в - t_{cp}}{\sigma_в}\right], \quad (3.29)$$

Или

$$f_в(t) = \frac{1}{0{,}2} \cdot \varphi\left[\frac{2 - 2{,}3}{0{,}2}\right] = 5 \cdot \varphi[-1{,}5].$$

С учетом соотношения (1.39) и данных табл.1 приложения 1 получим

$$f_в(t) = 5 \cdot \varphi[1{,}5] = 5 \cdot 0{,}1295 = 0{,}65.$$

Интенсивность восстановления по формуле (3.24) составит

$$\mu_в(t) = 0{,}65 / 0{,}93 = 0{,}70ч^{-1}.$$

Гамма – процентное время восстановления по формуле (3.6) с учетом (1.2) можно определить следующим образом

$$F_в(t) = 1 - \frac{\gamma}{100}. \quad (3.30)$$

Согласно (1.42) значение $F_в(t)$ определяется из выражения

$$F_в(t) = F_O\left[\left(t - t_{cp}\right)/\sigma_в\right] = 1 - \frac{\gamma}{100}. \quad (3.31)$$

После подстановки в (3.31) значения $\gamma = 80\%$ *получим*

$$F_O\left[\frac{\left(t - t_{cp}\right)}{\sigma_в}\right] = 0,20.$$

По таблице 2 приложения 1 по значению функции $F_0(x)$ определим значение x. Интерполируя, получим x=1.175. Тогда, аргумент предыдущего выражения

$$\frac{\left(t - t_{cp}\right)}{\sigma_в} = 1,175.$$

или

$$\left(t - t_{cp}\right) = 1,175 \cdot \sigma_в.$$

Поскольку $t < tcp$, то выражение примет вид

$$T_в(\gamma) = t = t_{cp} - 1,175 \cdot \sigma_в,$$

или

$$T_в(\gamma) = T_в - 1,175 \cdot \sigma_в,$$

т. е.

$$T_в(\gamma) = 2,3 - 1,175 \cdot 0,2 = 2,06 ч.$$

3.2.2. Определение показателей ремонтопригодности по результатам наблюдений

Пример 2. В результате наблюдения за процессом восстановления работоспособности 50 распределительных валов (РВ) установлено, что в течении первых t=4 ч. Было восстановлено 3О РВ, а в течение следующего за ним промежутка времени $\Delta\, t = 1$ *ч.* были восстановлены еще 8 РВ. Определить:

вероятность восстановления $\overline{P}_{в}(t)$ и интенсивность восстановления $\overline{\mu}_{в}(t)$ данной группы РВ в течение 4,5 ч.

Вероятность восстановления по статическим данным определяется по формуле (3.2) с учетом следующих соображений:

- число невосстановленных РВ к концу периода t составило 50-38 ед.;

- число невосстановленных РВ к концу периода t+ Δt составило 50-38=12 ед.;

- среднее число невосстановленных РВ на интервале времени Δt составит (20+12)/2=16 ед.

Тогда вероятность восстановления по формуле (3.2)

$$\overline{P}_{в}(t)=1-\frac{16}{50}=0,68.$$

Интенсивность восстановления определяется по формуле (3.14)

$$\overline{P}_{в}(t)=\frac{8}{16\cdot 1}=0,5ч^{-1}.$$

Пример 3. Определить 90%-ое время восстановления распределительных валов двигателя при условии, что закон распределения времени восстановления известен, а его параметры составляют:

а) закон нормального распределения:

$$\overline{T}_{в}=3,8ч;\sigma_{в}=0,22ч.$$

б) закон распределения Вейбулла:

$$\overline{T}_{в}=2,98ч;a=1,85ч;в=1,9;t_{CM}=0,15ч.$$

в) экспоненциальный закон распределения:

$$\overline{T}_{в}=4,1ч;\lambda=0,06ч^{-1}.$$

При законе нормального распределения времени восстановления значение гамма - процентного времени восстановления определяют по формуле (3.7). Для этого определим по данным табл. 8 приложения 1 значения квантиля закона $H_к(\gamma) = H_к(0.9) = 1.282$.

С учетом этого значение Т(γ) равно

$$\overline{T}_{в}(\gamma) = 3{,}8 - 1{,}282 \cdot 0{,}22 = 3{,}52ч.$$

При законе распределения Вейбулла гамма – процентное время восстановления определяют по формуле (3.8). Значение квантиля закона Вейбулла $H_к(1-\gamma)$ определяется по данным таблицы 9 приложения 1 - $H_к^в(1-\gamma) = H_к^в(1-0{,}9) = H_к^в(0{,}1) = 0{,}31$ ($при\ в = 1{,}9$).

С учетом этого значение $\overline{T}(\gamma)$ составит

$$\overline{T}_{в}(\gamma) = 0{,}31 \cdot 1{,}85 + 0{,}15 = 0{,}72ч.$$

При экспоненциальном законе распределения времени восстановления значение гамма – процентного времени восстановления определяют по формуле (3.9). При этом для γ = 0.90 значение Q_γ = 0,105. Тогда значение $\overline{T}(\gamma)$ равно

$$\overline{T}_{в}(\gamma) = 0{,}105 \cdot 4{,}1 = 0{,}43ч.$$

3.3 Задание к работе №3

3.3.1. Задание 1.

Определить вероятность восстановления $P_в(t)$, гамма – процентное время восстановления $T_в(\gamma)$, среднее время восстановления $T_в$ и интенсивность восстановления для tв=3ч при условиях, приведенных в таблице 3.1

Таблица 3.1

Исходные данные к заданию 1

Номер варианта	Закон	r, %	Параметры					Номер вариант	Закон	γ, %	Параметры				
			λ, $ч^{-1}$	$\sigma_в$, ч	tср, ч	а, ч	в				λ, $ч^{-1}$	$\sigma_в$, ч	tср, ч	а, ч	в
1	ЭЗР	80	0.6	-	-	-	-	11	ЗРВ	90	-	-	-	1.6	2.4
2	ЗРР	80	-	0.8	-	-	-	12	ЗН	85	-	0.3	4.1	-	-

3	ЗРВ	85	-	-	-	2.0	2.2	13	ЭЗР	99	0.8		-	-	-
4	ЗН	90	-	0.5	6.0	-	-	14	ЗРР	95	-	0.5	-	-	-
5	ЭЗР	90	0.5	-	-	-	-	15	ЗРВ	95	-		-	1.8	2.5
6	ЗРР	85	-	0.7	-	-	-	16	ЗН	95	-	0.8	8.5	-	-
7	ЗРВ	90	-	-	-	3.2	2.5	17	ЭЗР	80	0.4		-	-	-
8	ЗН	80	-	0.3	3.8	-	-	18	ЗРР	90	-	0.5	-	-	-
9	ЭЗР	95	0.7	-	-	-	-	19	ЗРВ	99	-		-	2.5	1.6
10	ЗРР	90	-	0.9	-	-	-	20	ЗН	95	-	0.3	3.5	-	-

3.3.2. Задание 2

Наблюдение за процессом восстановления N объектов показали, что в течении первых t=A ч было восстановлено n(t)=B объектов, а в течении следующего за ним промежутка времени $\Delta t = C ч$ были восстановлены еще n(Δt) = E объектов.

Определить: вероятность восстановления $\overline{P}_{в}(t)$ и интенсивность восстановления $\overline{\mu}_{в}(t)$ рассматриваемой группы объектов в течении времени t=Dч. Значения показателей приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Исходные данные к заданию 2

Номер варианта	Показатели						Номер варианта	Показатели					
	N	A	B	C	E	D		N	A	B	C	E	D
1	100	10	60	2	15	11.0	11	95	5	60	1	15	5.5
2	90	8	50	1	7	8.5	12	85	4	40	1	12	4.5
3	80	3	45	1	20	3.5	13	75	3	37	2	13	4.0
4	70	4	40	2	12	5.0	14	65	2	30	1	17	2.5
5	60	5	50	1	10	5.5	15	55	8	20	2	10	9.0
6	50	8	25	2	4	9.0	16	130	4	65	2	35	5.0
7	40	6	20	1	3	6.5	17	135	5	75	1	16	5.5
8	120	2	65	1	30	2.5	18	140	6	80	1	20	6.5
9	110	5	60	2	24	6.0	19	145	8	70	2	10	9.0
10	130	6	80	1	12	6.5	20	150	10	80	3	25	11.5

3.3.3. Задание 3

Определить гамма - процентное время восстановления $\overline{T}_в(\gamma)$ партии объектов при условии, что закон распределения времени восстановления известен, а его параметры приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3.

Исходные данные к заданию 3

Номер варианта	Параметры						Номер варианта	Параметры					
	закон	R,	$T_в^{-}, ч$	$\sigma_в, ч$	а,ч	в		закон	R,	$T_в^{-}, ч$	$\sigma_в, ч$	а,ч	в
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	ЭЗР	80	4.7	-	-	-	11	ЭЗР	95	2.4	-	-	-
2	ЗРВ	80	3.0	-	3.4	2.	12	ЗРВ	99	1.8	-	0.9	3.3
3	ЗНР	85	3.5	0.3	-	-	13	ЗНР	90	5.0	0.25	-	-
4	ЭЗР	90	3.6	-	-	-	14	ЭЗР	99	5.5	-	-	-
5	ЗРВ	90	3.2	-	2.3	1.	15	ЗРВ	95	2.6	-	1.2	3.5
6	ЗНР	80	6.0	0.45	-	-	16	ЗНР	99	4.5	0.35	-	-
7	ЭЗР	80	2.5	-	-	-	17	ЭЗР	90	3.8	-	13	-
8	ЗРВ	95	3.3	-	1.8	2.	18	ЗРВ	80	5.0	-	2.2	2.9
9	ЗНР	85	4.0	0.33	-	-	19	ЗНР	95	6.5	0.5	-	-
10	ЭЗР	95	3.5	-	-	-	20	ЭЗР	99	4.3	-	-	-

3.4. Контрольные вопросы к работе 3

1. Приведите определения свойства «ремонтопригодности».
2. В чем заключается свойство «ремонтопригодность»?
3. Перечислите единичные показатели ремонтопригодности и дайте их определения.
4. Являются ли понятия «контролепригодность» и «обслуживаемость» синонимами понятия «ремонтопригодность»?
5. Из каких составляющих состоит время восстановления?
6. Как вы понимаете смысл понятия «интенсивность восстановления»?
7. Может ли быть надежным объект, имеющий низкую ремонтопригодность?

8. Какой из двух показателей больше – среднее время восстановления или гамма процентное время восстановления при γ=80%?

9. Объясните механизм влияния ремонтопригодности на работоспособность объекта.

10. Как влияет ремонтопригодность на годовую наработку и производительность автомобиля?

Работа №4

4 Определение показателей сохраняемости

4.1 Теоретические основы определения показателей сохраняемости технических объектов

По ГОСТ 27.002-89 сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В зависимости от условий и режимов применения объекта требования сохраняемости ставят по-разному.

Для некоторых классов объектов может быть поставлено требование, чтобы после хранение объект находился в таком же состоянии, что и к моменту начала хранения (например, хранение автомобилей на заводе-изготовителе от момента выпуска до момента поставки в различную сеть). В этом случае объект будет удовлетворять требованиям безопасности, долговечности и ремонтопригодности, предъявляемым к объекту к моменту начала хранения.

В остальных (в большинстве) случаях требуется, чтобы объект сохранял достаточный запас работоспособности, т.е. обладал достаточной безотказностью и долговечностью после хранения и(или) транспортирования (например, двигатель автомобиля, подвергнутый консервации и находящийся на складе в качестве запасного агрегата).

Различают также сохраняемость объекта до ввода в эксплуатацию и сохраняемость объекта в период эксплуатации (при перерывах в работе). Во втором случае срок сохраняемости входит составной частью в срок службы объекта.

Сохраняемость объекта характеризуется двумя единичными показателями:

1) гамма-процентным сроком сохраняемости;

2) средним сроком сохраняемости.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ, выраженной в процентах.

Аналитически значение гамма-процентного срока сохраняемости по аналогии с выражением (1.11),(2.3) или (3.6) определяют по формуле

$$F_C\left(t_\gamma\right)=1-\frac{\gamma}{100}, \tag{4.1}$$

где $F_C\left(t_\gamma\right)$ – функция распределениия срока сохраняемости;

γ – процент объектов, выходящих из строя до достижения заданного срока хранения.

Статическая оценка гамма-процентного срока сохраняемости дается по формулам, аналогичным формулам (1.12)-(1.14), (2.4)-(2.6) и (3.7)-(3.9):

— при законе нормального распределения срока сохраняемости

$$\overline{T}_C(\gamma)=T_C-H_k(\gamma)\cdot\sigma_C, \tag{4.2}$$

где $\overline{T}_C$ - статическая оценка среднего срока сохраняемости;

σ_C - среднее квадратическое отклонение срока сохраняемости объекта,

— при законе распределения Вейбулла

$$\overline{T}_C(\gamma)=T_C-H_k^{в}(1-\gamma)\cdot a+t_{CM}, \tag{4.3}$$

где t_{CM} - величина смещения начала рассеивания срока сохраняемости объектов,

— при экспоненциальном законе распределения срока сохраняемости

$$\overline{T}_C(\gamma)=Q_\gamma\cdot\overline{T}_C. \tag{4.3}$$

Средний срок сохраняемости - математическое ожидание срока сохраняемости.

Аналитически средний срок сохраняемости определяют также как и другие аналитические показатели, т.е. по формулам (1.7), (2.1) и (3.10)

$$T_C=\int\limits_0^\infty t\cdot f_C(t)dt=\int\limits_0^\infty\left[1-F_C(t)\right]dt, \tag{4.5}$$

где $f_c(t)$ - плотность распределения срока сохраняемости;

$F_c(t)$ - функция распределения срока сохраняемости.

Статистическую оценку среднего срока сохраняемости вычисляют по формуле, аналогичной формуле (1.10), (2.2) и (3.11)

$$T_C = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^{N} \tau_{cj}, \qquad (4.6)$$

где τ_{cj} - срок сохраняемост j-го объекта.

4.2. Примеры определения показателей сохраняемости

4.2.1. Аналитические методы определения показателей сохраняемости объектов

Пример 1 . Определить средний и 90% гамма-процентный сроки сохраняемости партии объектов при условии, что закон распределения срока сохраняемости известен, а его параметры составляют:

1) экспоненциальный закон распределения с параметром λ=0,15 год$^{-1}$;

2) закон распределения Релея с параметром σ_c=1,7 года;

3) закон распределения Вейбулла с параметрами :а=3,1 года; в= 1,9;

4) закон нормального распределения с параметрами : $t_{ср}$ = 6,2 года; σ_c=1,5 года.

При экспоненциальном законе распределения срока сохраняемости величина среднего срока сохраняемости определяют по формуле (2.1), которая в данном случае будет иметь вид

$$T_C = \int_0^{\infty} \left[1 - F_C(t)\right] dt = \int_0^{\infty} \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda t}\right)\right] dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda,$$

т.е.

$$T_C = 1/0,15 = 6,67 \textit{года},$$

Величину гамма-процентного срока сохраняемости определим по формуле (4.1), которая для экспоненциального закона распределения записывается в виде

$$1 - F_C(\gamma) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - \frac{\gamma}{100}, \tag{4.8}$$

Или

$$e^{-\lambda t} = 0{,}01 \cdot \gamma,$$

После логарифмирования получим

$$-\lambda t = In(0{,}01 \cdot \gamma),$$

$$\overline{T}_C(\gamma) = t = \frac{In(0{,}01 \cdot \gamma)}{-0{,}15} = \frac{In(0{,}01 \cdot 90)}{-0{,}15} = 0{,}70\textit{года}.$$

При законе распределения Релея величину среднего срока сохраняемости определяют по формуле, аналогичной формулам (1.33) и (3.19)

$$T_C = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma_C. \tag{4.9}$$

или

$$T_C = \sqrt{\frac{3{,}14}{2}} \cdot 1{,}7 = 2{,}3\textit{года}.$$

Значение гамма-процентного срока сохраняемости определяют по формуле (4.1) с учетом выражения (1.2) и (1.33)

$$1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma_C^2}} = 1 - \frac{\gamma}{100}, \tag{4.10}$$

или

$$e^{-\frac{t^2}{2\sigma_C^2}} = 0{,}01 \cdot \gamma.$$

После логарифмирования получим

$$-\frac{t^2}{2\sigma_c^2} = \ln\,(0{,}01 \cdot r)$$

откуда

$$T_C(\gamma) = t = \sqrt{-2 \cdot \sigma_C^2 \cdot In(0{,}01 \cdot \gamma)},$$

$$T_C(\gamma) = \sqrt{-2 \cdot 1{,}7^2 \cdot In(0{,}01 \cdot 90)} = 0{,}78 \textit{года}.$$

При законе распределения Вейбулла величину среднего срока сохраняемости определяют по формуле (1.45)

$$T_C = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{в}\right), \tag{4.11}$$

или

$$T_C = 3{,}1 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1{,}9}\right) = 3{,}1 \cdot \Gamma(1{,}53).$$

Табличное значение функции Г(x) от аргумента x=1,53 по данным табл. 3 приложения 1 составляет

$$\Gamma(1{,}53) = 30{,}8876.$$

После подставки получим

$$T_C = 3{,}1 \cdot 0{,}8876 = 2{,}75 \textit{года}.$$

Значения гамма-процентного срока сохраняемости при законе распределения срока сохраняемости Вейбулла определяют по формуле (4.1) с учетом выражения (1.44)

$$F_C(t_\gamma) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^в} = 1 - \gamma, \tag{4.12}$$

или

$$e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^{в}} = 0{,}01 \cdot \gamma.$$

Если $\left(\frac{t}{a}\right)^{в} = \alpha$, то выражение примет вид

$$e^{-\alpha} = 0{,}01 \cdot \gamma.$$

После логарифмирования получим

$$-\alpha = In\left(0{,}01 \cdot \gamma\right).$$

При γ=90% значения ln(0,01·90)= -0,105 откуда

$$\alpha = 0{,}105.$$

С учетом принятых ранее обозначений

$$\left(\frac{t}{a}\right)^{в} = 0{,}105,$$

откуда

$$T\left(\gamma\right) = t = a \cdot \sqrt[в]{0{,}105},$$

или

$$T\left(\gamma\right) = 3{,}1 \cdot \sqrt[1{,}9]{0{,}105} = 0{,}93 года.$$

При законе нормального распределения срока сохраняемости объектов значения среднего срока сохраняемости определяют по формуле

$$T_C = t_{cp} = 6{,}2 года.$$

Значение гамма-процентного срока сохраняемости определяют по формуле (4.1) при

$$F_C\left(t_\gamma\right) = F_O\left(\frac{t_C - t_{cp}}{\sigma_C}\right) = 1 - \frac{\gamma}{100}. \tag{4.13}$$

Поскольку гамма-процентный показатель представляет сбой нижнюю доверительную границу рассеивания, то $t_c<t_{cp}$ и аргумент, стоящий в скобках будет иметь отрицательное значение. С учетом свойства (1.40) имеем

$$1-F_O\left(\frac{t_{cp}-t_c}{\sigma_c}\right)=1-\frac{\gamma}{100}. \qquad (4.14)$$

откуда

$$F_O\left(\frac{t_{cp}-t_c}{\sigma_c}\right)=\frac{\gamma}{100}. \qquad (4.15)$$

По данным табл. 3 приложения 1 при $F_0(x)=0{,}9$ значение аргумента $x=1{,}28$. Следовательно имеем

$$\frac{t_{cp}-t_c}{\sigma_c}=1{,}28,$$

$$T(\gamma)=t_c=t_{cp}-1{,}28\cdot\sigma_c.$$

После подставки выражений, получим

$$T(\gamma)=6{,}2-1{,}28\cdot 1{,}50=4{,}28 \textit{года}.$$

4.2.2. Определение показателей сохраняемости объектов по результатам наблюдений

Пример 2. В результате наблюдения за группой из N=5объектов были зафиксированы следующие сроки их сохраняемости: $\tau_{c1}=3{,}7\ \textit{года},\ \tau_{c2}=4{,}1\ \textit{года}, \tau_{c3}=4{,}3\ \textit{года}, \tau_{c4}=4{,}7\ \textit{года и}\ \tau_{c5}=5{,}1\ \textit{года}$. Определить средний срок сохраняемости $\overline{T}_c$ и среднее квадратическое отклонение срока сохраняемости σ_c данной группы объектов.

По результатам статистических наблюдений значение среднего срока сохраняемости определяют по формуле (4.6). После подстановки значений получим

$$\overline{T}_c=\frac{1}{5}\cdot(3{,}7+4{,}1+4{,}3+4{,}7+5{,}1)=4{,}4\ \textit{года}.$$

Среднее квадратическое отклонение срока сохраняемости в принятых в данном примере обозначениях определяют по формуле

$$\sigma_C = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N}\left(\tau_{Cj} - \overline{T_C}\right)^2}{N-1}}, \tag{4.16}$$

или

$$\sigma_C = \sqrt{\frac{(3,7-4,4)^2 + \left(4,1-4,4\right)^2 + \left(4,3-4,4\right)^2 + \left(4,7-4,4\right)^2 + \left(5,1-4,4\right)^2}{5-1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,49+0,09+0,01+0,09+0,49}{4}} = 0,54 \textit{года}.$$

Пример 3. Определить 90% гамма-процентный срок сохраняемости при условии, что закон распределения срока сохраняемости объектов известен, а его параметры составляют:

а) Закон нормального распределения: $\bar{T}_c = 5{,}2\ \textit{года}, \sigma_c = 1{,}2\ \textit{года}$;

б) Закон распределения Вейбулла: а=3,3 года, в=2,7 ; $t_{см}$=1,5 года;

в) Экспоненциальный закон распределения: $\bar{T}_c = 4{,}8\ \textit{года}$

При нормальном законе распределения срока сохраняемости значение гамма-процентного срока сохраняемости определяются по формуле (4.2). При этом значения квантиля закона $H_к(0{,}90)$ по данным таблицы 8 приложения 1 составляет $H_к(0{,}90)$= 1,282. После подстановки значений в формулу (4.2), получаем

$$\overline{T}_C\left(\gamma\right) = 5,2 - 1,282 \cdot 1,5 = 3,3 \textit{года}.$$

При законе распределения Вейбулла значение гамма-процентного срока сохраняемости определяют по формуле (4.3). При этом значение квантиля закона Вейбулла $H_K^B(1-\gamma)$ для γ= 0,9 и в=2,7 по данным табл. 9 приложения 1 составляем $H_K^B(1-0{,}9) = 0{,}43$. После подстановки значений в формулу (4.3) получим

$$\overline{T}\left(\gamma\right) = 0,105 \cdot 4,8 = 0,5 \textit{года}.$$

4.3.Задания к работе№4

4.3.1. Задание 1.

Определить средний и гамма-процентный сроки сохраняемости партии автомобильных двигателей при условии, что закон распределения срока сохраняемости известен, а его параметры следует принимать по данным табл. 4.1

Таблица 4.1

Исходные данные к заданию 1

Номер варианта	Закон	γ,%	параметры					Номер варианта	Закон	γ,%	Параметры				
			λ, год$^{-1}$	$t_{ср}$, год	σ_c, год	а, год	в				λ, год$^{-1}$	$t_{ср}$, год	σ_c, год	а, год	в,
1	ЭЗР	80	0,2	-	-	-	-	11	ЭЗР	95	0,35	-	-	-	-
2	ЗРР	85	-	-	3,5	-	-	12	ЗРР	80	-	-	2,5	-	-
3	ЗРВ	80	-	-	-	4,0	1,7	13	ЗРВ	85	-	-	-	3,9	2,0
4	ЗНР	85	-	4,9	1,3	-	-	14	ЗНР	90	-	5,1	1,7	-	-
5	ЭЗР	90	0,3	-	-	-	-	15	ЭЗР	99	0,40	-	-	-	-
6	ЗРР	90	-	-	3,0	-	-	16	ЗРР	95	-	-	3,0	-	-
7	ЗРВ	95	-	-	-	3,6	2,5	17	ЗРВ	90	-	-	-	3,3	2,9
8	ЗНР	80	-	4,6	1,8	-	-	18	ЗНР	95	-	3,8	1,4	-	-
9	ЭЗР	90	0,5	-	-	-	-	19	ЭЗР	80	0,55	-	-	-	-
10	ЗРР	95	-	-	4,0	-	-	20	ЗРР	80	-	-	2,2	-	-

4.3.2. Задание 2.

Определить 85% гамма-процентный срок сохраняемости группы объектов по результатам наблюдений. Вид законов распределения срока сохраняемости и их параметры приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Исходные данные к задания 2

Номер варианта	закон	Параметры						Номер варианта	закон	Параметры					
		λ, год$^{-1}$	$t_{ср}$, год	$\sigma_{с}$, год	а, год	в	$t_{см}$ год			λ, год$^{-1}$	$t_{ср}$, год	$\sigma_{с}$, год	а, год	в,	$t_{см}$ год
1	ЗНР	-	4,5	1,45	-	-	-	11	ЗРВ	-	-	-	4,3	2,5	1,5
2	ЗРВ	-	-		2,8	3,0	0,4	12	ЭЗР	-	-	-	-	-	-
3	ЭЗР	0,28	-	-	-	-	-	13	ЗНР	-	4,8	1,6	-	-	-
4	ЗНР	-	3,8	1,20	-	-	-	14	ЗРВ	-	-	-	5,5	3,4	2,0
5	ЗРВ		-	-	3,0	1,9	0,7	15	ЭЗР	0,42	-	-	-	-	-
6	ЭЗР	0,33	-	-	-	-	-	16	ЗНР	-	5,5	1,85	-	-	-
7	ЗНР	-	3,6	1,15	-	-	-	17	ЗРВ	-	-	-	3,8	1,9	0.8
8	ЗРВ	-	-	-	3,5	1,8	0,9	18	ЭЗР	0,26			-	-	-
9	ЭЗР	0,25	-	-	-	-	-	19	ЗНР	0,6	-	1,35	-	-	-
10	ЗНР	-	3,2	0,95	-	-	-	20	ЗРВ	-	-	-	4,5	2,3	1,9

4.4. Контрольные вопросы к работе 4

1. Приведите определение свойства «сохраняемости».
2. Назовите единичные показатели сохраняемости и приведите их стандартные определения.
3. В каком случае срок сохраняемости является составной частью срока службы автомобиля?
4. Какой из двух показателей одной и той же группы объектов больше – гамма-процентный или средний срок сохраняемости?
5. Объясните механизм влияния сохраняемости объекта на срок его службы.
6. Может ли сохраняемость автомобиля влиять на его годовую наработку?
7. Назовите основные причины из-за наличия которых ухудшается сохраняемость объектов?

8. Является ли верным утверждение: « сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования»?

9. В каких случаях после хранения объект может оказаться в неработоспособном или в предельном состояниях?

10. Для каких объектов может быть поставлено требование, чтобы после хранения объект находился в том же состоянии, что и к моменту начала хранения?

Работа №5

5. Определение комплексных показателей надежности

5.1. Технические основы определения комплексных показателей надежности объектов

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 комплексным называется такой показатель надежности, который количественно характеризует не менее двух свойств, составляющих надежность объекта, например, безотказность и ремонтопригодность.

Указанным стандартом предусмотрено применение четырех комплексных показателей надежности:

- коэффициент готовности;
- коэффициент оперативной готовности;
- коэффициент технического использования;
- коэффициент сохранения эффективности.

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

В соответствии с данным определением моменты времени для определения коэффициента готовности не могут выбираться на тех интервалах, где применение объекта по назначению заранее не предусматривается (интервалы плановых технических обслуживаний и ремонтов, планируемого хранения или транспортировки).

Для любых распределений наработки между отказами Т и времени восстановления $T_в$, имеющих конечные значения Т и $T_в$, коэффициент готовности (стационарный) определяют по формуле

$$K_Г = \frac{T}{T + T_в}. \tag{5.1}$$

При этом

$$K_Г = \lim_{t \to \infty} K_Г(t), \tag{5.2}$$

где $K_Г(t)$ - нестационарный коэффициент готовности на достаточно малом интервале.

По статистическим данным оценку коэффициента готовности (стационарного) вычисляют по формуле

$$\overline{K}_{\Gamma} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{T_i}{T_i + T_{в_i}}, \tag{5.3}$$

где N - число объектов в момент начала исчислений наработки, т.е. в момент t=0;

T_i – наработка i-го объекта на отказ (время чистой работы объекта);

$T_{в_i}$ – время восстановления работоспособности i-го объекта (время простоев из-за неплановых ремонтов) за рассматриваемый период эксплуатации.

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Значение коэффициента оперативной готовности определяют из выражения

$$K_{О\Gamma} = K_{\Gamma} \cdot P\left(t_{О\Gamma}\right), \tag{5.4}$$

где $P\left(t_{О\Gamma}\right)$ - вероятность безотказной работы объекта в течение заданного интервала времени (наработки) $t_{О\Gamma}$.

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период

$$K_{ТИ} = \frac{M\left(t_p\right)}{M\left(t_p\right) + M\left(t_{ТО}\right) + M\left(t_{рем}\right)}, \tag{5.5}$$

где $M\left(t_p\right)$ - математическое ожидание наработки восстанавливаемого объекта;

$M\left(t_{TO}\right)$ - математическое ожидание интервалов времени простоя при техническом обслуживание;

$M\left(t_{рем}\right)$ - математическое ожидание интервалов времени простоя при ремонте (плановом и неплановом).

По результатам статических наблюдений оценку коэффициента технического использования вычисляют по формуле

$$K_{ТИ} = \frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_p + \bar{t}_{TO} + \bar{t}_{рем}}, \tag{5.6}$$

где $\bar{t}_p$ - суммарная наработка всех объектов за рассматриваемый период времени;

$\bar{t}_{TO}$ - суммарное время простоя при техническом обслуживании;

$\bar{t}_{рем}$ - суммарное время простоя в ремонте;

Коэффициент сохранения эффективности – отношение значения показателя эффективности использования объекта по значению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

В общем случае коэффициент сохранения эффективности характеризует степень влияния отказов элементов объекта на эффективность его применения по назначению

$$K_{эф} = Э/Э_o, \tag{5.7}$$

где $Э$ – реальный выходной эффект, определяемый с учетом фактической надежности;

$Э_o$ – номинальное значение выходного эффекта, вычисленного при условии, что отказы объекта в течение того же периода эксплуатации не возникают.

Аналитическое выражение для расчета эффекта для различных типов объектов приведен в ГОСТ 27.003-89.

5.2. Примеры определения комплексных показателей надежности объектов

5.2.1. Аналитическое методы определения комплексных показателей надежности

Пример 1. Интенсивность отказа одного из узлов двигателя является величиной постоянной и равной λ=0,015 (1/ч). Среднее время восстановления равно $T_в$=10ч. Вычислить вероятность застать двигатель в работоспособном состоянии в момент времени t=10ч.

Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, и, начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени характеризуется коэффициентом оперативной готовности, который вычисляют по формуле (5.4). при этом стационарное значение коэффициента готовности определяется по формуле (5.1).

По условию данного примера интенсивность отказов постоянна, поэтому среднюю наработку на отказ определяют по формуле (1.25)

$$T = 1/\lambda, \tag{5.9}$$

или

$$T = 1/0,015 = 66,7ч.$$

Коэффициент технической готовности (стационарный) по формуле (5.1) составит

$$K_Г = \frac{66,7}{66,7+10}.$$

Вероятность безотказной работы объекта в течение времени t при λ=const определяются по формуле (1.26)

$$P(t) = e^{-0,015 \cdot 10} = 0,86.$$

Коэффициент оперативной готовности двигателя в работоспособном состоянии составит

$$K_{ОГ} = 0,87 \cdot 0,86 = 0,75.$$

Пример 2. Система состоит из5 узлов, причем отказ одного из них ведет к отказу всей системы. Известно, что первый узел отказал 34 раза в течении 952ч работы, второй 24 раза в течение 960ч работы, а остальные узлы в течение 210ч отказали 4,6 и 5 раз соответственно. Требуется определить среднюю наработку на отказ и интенсивность отказов системы в целом, если для каждого из пяти узлов справедлив экспоненциальный закон надежности.

В соответствие с выражением (1.9) средняя наработка системы на отказ составляет

$$T = \frac{952 + 960 + 210 + 210 + 210}{34 + 24 + 4 + 6 + 5} = 34,8ч.$$

Интенсивность отказов системы по формуле (1.25)

$$\Lambda = \frac{1}{34,8} = 0,0287\frac{1}{ч}.$$

5.3. Задание к работе№5

5.3.1. Задание 1.

Коэффициент технической готовности одного из элементов сложной системы равен $К_{ог}$ среднее время восстановление элемента составляет $t_в$. Требуется определить вероятность застать систему в работоспособном состоянии в момент времени t. Исходные данные к заданию проведены в табл. 5.1

Таблица 5.1

Исходные данные к заданию 1

Вариант	Показатели			Вариант	Показатели		
	$К_{ог}$	$t_в$	t		$К_{ог}$	$t_в$	t
1	0,80	50	10	11	0,90	95	100
2	0,81	60	15	12	0,91	105	95
3	0,82	70	20	13	0,92	110	80
4	0,83	80	25	14	0,93	115	85
5	0,84	90	30	15	0,94	120	70

Вариант	Показатели			Вариант	Показатели		
	$K_{ог}$	$t_в$	t		$K_{ог}$	$t_в$	t
6	0,85	100	15	16	0,95	125	75
7	0,86	55	25	17	0,96	130	65
8	0,87	65	35	18	0,97	50	20
9	0,88	75	45	19	0,98	60	30
10	0,89	85	55	20	0,99	70	10

5.3.2.Задание 2.

В течение некоторого периода времени у автомобиля было зафиксирован n отказов. До начала наблюдения автомобиль проработал t_1=$A_ч$, к концу наблюдения наработка составила t_2=$B_ч$. Требуется определить коэффициент технического использования, если среднее время простоя при техническом обслуживание и ремонте составило соответственно $\bar{t}_{то} = C_ч$ и $\bar{t}_{рем} = D_ч$. Исходные данные к заданию 2 приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Исходные данные к заданию 2

Вариант	Показатели					Вариант	Показатели				
	n	t_1	t_2	$\bar{t}_{то}$	$\bar{t}_{рем}$		n	t_1	t_2	$\bar{t}_{то}$	$\bar{t}_{рем}$
1	5	100	350	1,5	2,0	11	10	120	2050	30	15,5
2	6	70	500	2,5	3,0	12	15	70	1730	27	18,0
3	7	80	420	1,8	2,5	13	30	60	1650	35	10,5
4	8	150	600	3,0	2,5	14	35	50	1800	40	12,0
5	10	200	650	3,5	3,0	15	11	20	980	20	15,0
6	12	250	750	4,0	3,0	16	13	30	1030	25	20,0
7	14	300	900	4,5	3,5	17	17	40	940	15	10,0
8	16	250	850	5,0	4,5	18	19	50	1810	25	15,0
9	20	350	950	5,5	3,5	19	21	60	1980	10	7,5
10	25	50	1500	32,0	10,0	20	23	70	2070	30	15,0

5.4. Контрольные вопросы к работе 5

1. В чем заключается различие между единичными и комплексными показателями надежности объектов?
2. Перечислите комплексные показатели надежности и дайте им определения.
3. Запишите аналитические выражения для определения коэффициента технической готовности и использования.
4. Объясните разницу между коэффициентами готовности и оперативной готовности.
5. Что характеризует коэффициент технического использования, вычисленный для парка автомобилей за промежуток времени, равный календарному за году?
6. Что характеризует коэффициент готовности, вычисленный для парка автомобилей за год?
7. Какой из двух комплексных показателей: коэффициент готовности или коэффициент технического использования, больше по величине?
8. Как изменится надежность объекта, если увеличить затраты времени на профилактические мероприятия по поддержанию исправности и работоспособности?
9. Как измениться надежность объекта, если за счет повышения качества технического обслуживания и ремонта повысить его наработку на отказ?
10. Какие свойства надежности объекта характеризуют коэффициенты готовности и технического использования?

Работа №6

6. Расчет систем на надежность

6.1. Теоретические основы расчета систем на надежность

Рассчитать систему на надежность – это значит, определить одну или несколько характеристик ее надежности.

В зависимости от назначения анализа системы различают два класса методов расчета надежности:

- структурные; - функциональные.

При расчете структурной надежности осуществляется определение значений показателей надежности системы, обусловленное надежностью ее элементов и разветвленностью связей между элементами.

Расчет функциональной надежности – это определение показателей надежности выполнения объектом заданных функций.

Методы расчета на надежность различаются так же в зависимости:

- от характера отказов;
- по способу соединения элементов систем;
- от вида закона распределения времени безотказной работы элемнтов системы;
- по признаку восстанавливаемости элементов и системы в целом.

В зависимости от характера отказов элементов систем различают методы расчета надежности при:

- внезапных; - постепенных; - перемежающихся отказах.

По способу соединения элементов в системе различают:

- расчет надежности при основном соединении элементов;
- расчет систем с резервированием (резервными элементами).

В зависимости от вида закона распределения времени безотказной работы элементов различают:

- расчеты надежности при экспоненциальном распределении;
- при нормальном распределении;
- при распределении Вейбулла.

По признаку восстанавливаемости методы расчета делятся на:

- методы расчета восстанавливаемых систем;
-методы расчета невосстанавливаемых систем.

В данной работе рассматриваются невосстанавливаемые системы при основном соединении элементов с постепенными отказами и экспоненциальном законом распределения времени безотказной работы.

Различают три способа соединения (совмещения) элементов в систему:

- основное (последовательное) соединение;
- параллельное соединение;
- смешанное соединение.

Последовательным – называют соединение, при котором отказ одного из элементов, приводит к отказу всей системы (рис.6.1).

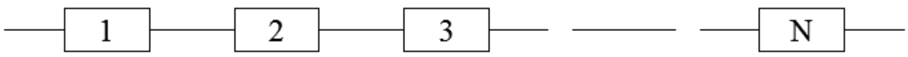

Рис. 6.1. Основное (последовательное) соединение элементов в системе

При последовательном соединении вероятность безотказной работы системы, состоящей из N элементов при условии, что отказы элементов независимы, определяется по формуле

$$P(t)=\prod_{i=1}^{N} P_i(t), \tag{6.1}$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i-ого элемента системы.

Если интенсивность отказов элементов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \ldots . \lambda_N$, вероятность безотказной работы системы выражается формулой

$$P(t)=e^{-\int_0^t \lambda_1(\tau)d\tau} \cdot e^{-\int_0^t \lambda_2(\tau)d\tau} \cdot \ldots \cdot e^{-\int_0^t \lambda_i(\tau)d\tau} \cdot \ldots \cdot e^{-\int_0^t \lambda_N(\tau)d\tau} . \tag{6.2}$$

Если поток отказов стационарен ($\lambda_i = const$), вероятность безотказной работы определится из выражения

$$P_i(t)=e^{-\lambda_i \cdot t}, \tag{6.3}$$

Или

$$P_i(t) = \prod_{i=1}^{N} e^{-\lambda_i \cdot t} = \exp\left\{-t \cdot \sum_{i=1}^{N} \lambda_i\right\}. \qquad (6.4)$$

Вычисление других количественных характеристик (показателей) безотказности осуществляется по формулам:

- интенсивность отказов системы

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i, \qquad (6.5)$$

- средняя наработка до отказа

$$T_1 = \frac{1}{\Lambda} = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{N} \lambda_i, \qquad (6.6)$$

- плотность распределения времени безотказной работы

$$f(t) = \Lambda \cdot e^{-\Lambda \cdot t} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \cdot exp\left\{-t \cdot \sum_{i=1}^{N} \lambda_i\right\}. \qquad (6.7)$$

Параллельным – называют соединение, при котором отказ одного из элементов не сопровождается отказом всей системы (рис.6.2).

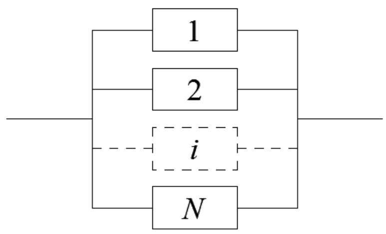

Рис. 6.2. Параллельное соединение элементов в системе

$$P(t) = 1 = \prod_{i=1}^{N} \left[1 - P_i(t)\right]. \qquad (6.8)$$

Смешанным – называют соединение, в составе которого имеются как последовательно, так и параллельно включенные элементы (рис.6.3)

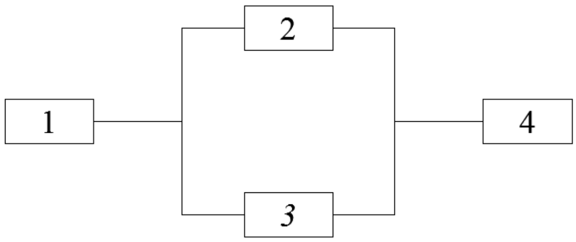

Рис. 6.3. Смешанное соединение элементов в системе

Вероятность безотказной работы системы со смешанным соединением элементов, подсчитывают путем перемножения вероятностей безотказной работы всех элементов, соединенных последовательно, на общую вероятность безотказной работы групп элементов с параллельным соединением.

6.2. Примеры расчета системы на надежность

Пример 1. Система состоит из пяти блоков, отказ любого из которых ведет к отказу системы. Надежность блоков характеризуется вероятностью безотказной работы в течении пробега t, которая состовляет: $P_1(t) = 0.99$; $P_2(t) = 0.98$; $P_3(t) = 0.97$; $P_4(t) = 0.96$; $P_5(t) = 0.95$. Определить: верояность безотказной работы P(t), интенсивность отказов λ(t) и среднюю наработку до отказа T_1 системы при t=1000км. пробега, если для блоков справедлив экспоненциальный закон надежности.

По условию блоки системы имеют последовательное соединение, по этому ее вероятность безотказной работы определится по формуле (6.1)

$$P(t) = 0{,}91 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}95 = 0{,}86.$$

Интенсивность отказов системы определится по формуле (6.4) с учетом выражения (6.5)

$$P(t) = exp\{-t \cdot \Lambda\}, \tag{6.9}$$

или

$$In\{P(t)\} = -t \cdot \Lambda,$$

откуда

$$\Lambda = In\{P(t)\} / (-t).$$

$$\Lambda = \frac{In(0{,}86)}{-1000} = \frac{-0{,}15}{-1000} = 0{,}15 \cdot 10^{-3} км^{-1}.$$

Средняя наработка системы до отказа по формуле (6.6) составит

$$T_1 = \frac{1}{0{,}15 \cdot 10^{-3}} = 6666{,}7 км.$$

Расчет вероятности безотказной работы системы показывает, что при последовательном соединении элементов надежность всей системы меньше, чем надежность наименее надежного из ее элементов.

Пример 2. Система состоит из четырех устройств, соединенных как покназано на рис.6.4. Определить: вероятность безотказной работы и интенсивность отказов системы, а также интенсивность отказов каждого из ее элементов в течение 100ч работы при условии, что для всех устройств справедлив экспоненциальный закон надежности, а вероятность безотказной работы элементов в течение указанного времени составляет: $P_1(t) = 0.97$; $P_2(t) = 0.96$; $P_3(t) = 0.95$; $P_4(t) = 0.98$.

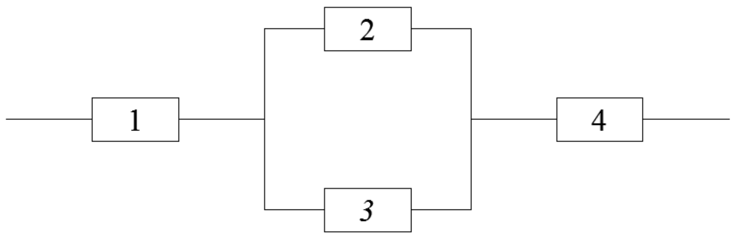

Рис.6.4. Схема соединения элементов (устройств) системы

Система имеет смешанное соединение элементов, поэтому ее вероятность безотказной работы определяется следующим образом

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_{2,3}(t) \cdot P(t), \tag{6.10}$$

где $P_{2,3}(t)$ – вероятность безотказной работы двух элементов, включенных параллельно.

Для них согласно формулы (6.8), вероятность безотказной работы составит

$$P_{2,3}(t) = 1 - \left[1 - P_2(t)\right] \cdot \left[1 - P_3(t)\right], \tag{6.11}$$

$$P_{2,3}(t) = 1 - \left[1 - 0{,}96\right] \cdot \left[1 - 0{,}95\right] = 0{,}998.$$

Тогда вероятность безотказной работы системы согласно выражения (6.10)

$$P(t) = 0,97 \cdot 0,998 \cdot 0,98 = 0,95.$$

Интенсивность отказов системы по формуле (6.9)

$$\Lambda = In(0,95)/(-100) = 5,1 \cdot 10^{-4} ч^{-1}.$$

Аналогично интенсивность отказов каждого из элементов (устройств) составит:

$$\lambda_1(t) = \frac{In(0,97)}{-100} = 3,0 \cdot 10^{-4} ч^{-1}; \lambda_2(t) = \frac{In(0,96)}{-100} = 4,1 \cdot 10^{-4} ч^{-1};$$
$$\lambda_3(t) = \frac{In(0,95)}{-100} = 5,1 \cdot 10^{-4} ч^{-1}; \lambda_4(t) = \frac{In(0,98)}{-100} = 2,0 \cdot 10^{-4} ч^{-1}.$$

При вычислении вероятности безотказной работы элементов 2 и 3 по формуле (6.11) их общая вероятность безотказной работы оказалась равной $P_{2.3}$(t)=0.998, в то время как тот же показатель у элементов составлял: P_2(t)=0.96 и P_3(t)=0.95. Это позволяет сделать вывод, что при параллельном соединении элементов их общая вероятность безотказной работы выше, чем у самого надежного из элементов.

Пример 3. Система состоит из 10 тыс.элементов, отказ любого из которых приводит к отказу системы. Средняя интенсивность отказов элементов равна $0.3*10^{-6}ч^{-1}$. Определить: вероятность безотказной работы, плотность распределения времени безотказной работ и среднюю наработку системы до отказа за время t=100ч.

Поскольку все элементы системы равнонадежны, интенсивность отказов системы можно определить по формуле

$$\Lambda = N \cdot \lambda_i(t), \tag{6.12}$$

где N - число элементов системы;

$\lambda_i(t)$ - интенсивность отказов i – ого элемента системы..

После подстановки значений получим

$$\Lambda = 10000 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} = 0,3 \cdot 10^{-2} \frac{1}{ч}.$$

Средняя наработка системы до отказа по формуле (6.4) с учетом выражения (6.5)

$$T_1 = \frac{1}{0,3 \cdot 10^{-2}} = 333,0ч.$$

Вероятность безотказной работы системы по формуле (6.4) с учетом выражения (6.5)

$$P(t) = exp\left\{-100 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2}\right\} = 0,74.$$

Плотность распределения времени безотказной работы системы по формуле (6.7) составит

$$f(t) = 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 100} = 2,2 \cdot 10^{-3}.$$

6.3 Задание к работе№6

6.3.1 Задание 1.

Система состоит из четырех блоков, отказ любого из которых ведет к отказу системы.

Определить: вероятность безотказной работы P(t), плотность распределения времени безотказной работы f(t), интенсивность отказов $\lambda(t)$ и среднюю наработку до отказа T_1 системы в течение наработки 500ч. Надежность каждого из шести элементов системы характеризуется вероятностью безотказной работы, которая приведена в табл. 6.1.

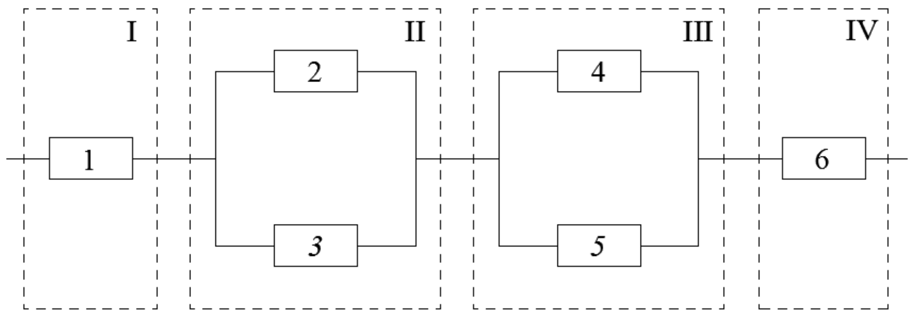

Рис.6.5. Схема к заданию 1:
1,2,3,4 – блоки системы; 1-6- элементы системы.

Таблица 6.1

Исходные данные к заданию 1

Вари ант	Вероятность безотказной работы						Вари ант	Вероятность безотказной работы					
	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$P_4(t)$	$P_5(t)$	$P_6(t)$		$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$P_4(t)$	$P_5(t)$	$P_6(t)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.99	0.97	0.97	0.96	0.96	0.98	11	0.96	0.89	0.89	0.91	0.91	0.95
2	0.98	0.95	0.95	0.97	0.97	0.96	12	0.95	0.80	0.80	0.85	0.85	0.90
3	0.85	0.90	0.90	0.95	0.95	0.90	13	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
4	0.89	0.80	0.80	0.85	0.85	0.89	14	0.99	0.88	0.88	0.85	0.85	0.99
5	0.90	0.84	0.86	0.85	0.87	0.90	15	0.88	0.75	0.75	0.80	0.80	0.90
6	0.95	0.85	0.85	0.86	0.86	0.85	16	0.94	0.90	0.90	0.87	0.87	0.96
7	0.97	0.84	0.86	0.90	0.90	0.98	17	0.87	0.60	0.60	0.70	0.70	0.87
8	0.92	0.85	0.90	0.91	0.94	0.93	18	0.85	0.65	0.65	0.75	0.80	0.83
9	0.91	0.80	0.85	0.95	0.90	0.90	19	0.90	0.85	0.80	0.75	0.85	0.95
10	0.93	0.95	0.95	0.96	0.96	0.94	20	0.80	0.90	0.75	0.75	0.85	0.90

6.3.2. Задание 2

Система состоит из N равнонадежных элементов, отказ любого из которых приводит к отказу системы. Интенсивность отказов одного элемента составляет $\lambda(t)$. Определить: вероятность безотказной работы P(t), плотность распределения времени безотказной работы f(t), среднюю наработку до отказа T_1 и интенсивность отказов $\lambda(t)$ системы в течении t часов при условии, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Значение показателей N, $\lambda(t)$ и t приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Исходные данные к заданию 2

Вариант	Показатели			Вариант	Показатели		
	N, ыс.ед	$\lambda(t), \frac{1}{ч}$	t, ч		N, тыс.ед	$\lambda(t), \frac{1}{ч}$	t, ч
1	20	$0.2*10^{-6}$	65	11	3	$0.15*10^{-5}$	50
2	19	$0.25*10^{-6}$	60	12	4	$0.30*10^{-5}$	100
3	18	$0.35*10^{-6}$	55	13	5	$0.25*10^{-5}$	150
4	17	$0.40*10^{-6}$	50	14	6	$0.35*10^{-5}$	25
5	16	$0.45*10^{-6}$	45	15	7	$0.40*10^{-5}$	75
6	15	$0.50*10^{-6}$	40	16	8	$0.45*10^{-5}$	55
7	14	$0.55*10^{-6}$	35	17	9	$0.50*10^{-5}$	65
8	13	$0.60*10^{-6}$	30	18	10	$0.55*10^{-5}$	50
9	12	$0.65*10^{-6}$	25	19	21	$0.65*10^{-5}$	45
10	11	$0.70*10^{-6}$	20	20	22	$0.75*10^{-5}$	40

6.4. Контрольные вопросы к работе 6

1. Что означает «рассчитать систему на надежность»?
2. Как классифицируют методы расчета систем на надежность?
3. В чем заключается расчет структурной надежности системы?
4. В чем содержание расчета функциональной надежности?
5. Каким образом различают системы по способу соединения элементов?
6. Какое соединение элементов системы называют последовательным?
7. Какое соединение элементов системы называют смешанным?
8. Напишите основные аналитические соотношения расчета надежности при основном соединении элементов системы.
9. В чем заключается основной недостаток системы с основным соединением элементов?

10. Как определяется вероятность безотказной работы систем с параллельным и смешанным соединением элементов?

Работа №7

7. Определения показателей надежности по результатам испытаний.

7.1 Сбор и обработка информации о надежности объектов.

В соответствии с ГОСТ 16504-81 контроль качества продукции осуществляется посредством испытаний.

Испытания – экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата взаимодействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий.

Различают более 40 видов испытаний, в числе которых и испытания на надежность.

Испытания на надежность проводятся в строго определенных условиях, определяемых программой испытаний, по определенной методике и в соответствии с планом испытаний.

Программа испытаний – организационно – методический документ, обязательный к выполнению, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний.

Методика испытаний – организационно-методический документ, обязательный к выполнению, включающий метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды.

План испытаний – правило, устанавливающее общий порядок проведения испытаний.

Испытания на надежность проводятся по одному из пяти планов: [NUN], [NVT], [NUr], [NRT], [NRr], латинские буквы в шифрах которых имеют следующие значения:

- N – число испытуемых объектов;
- U – объекты в процессе испытаний не восстанавливаются и не заменяются новыми;
- T – наработка, по достижении которой испытания прекращают;

- R – вышедшее из строя объекты восстанавливаются и вновь устанавливаются под наблюдение;

- r – заданное количество показателей надежности, например, r отказов.

Таким образом, во всех цифрах планов первая буква (N) указывает объем выборки, вторая – условия (снятие объекта с испытаний и (или) восстановление с последующим видом вводом объекта в процесс испытаний (R), а третья – момент окончания испытаний (до появления отказов или наступления предельного состояния у всех N объектов, или до момента достижения наработки T, или до момента, когда будут зафиксированы r отказов).

Собранная в процессе испытаний информация подвергается статистической обработке для определения показателей надежности (ПН).

Общий алгоритм статистической обработки информации, полученной при испытаниях на надежность, содержит следующие этапы:

1. Упорядочение информации, т.е. расположение зарегистрированных при испытаниях показателей в порядке их возрастания и (или) убывания;
2. Построение статистического ряда исходной информации и определение величины смещения начала рассеивания показателей;
3. Определение среднего значения и среднего квадратического отклонения показателя надежности;
4. Проверка исходной информации на достоверность (выпадающие точки);
5. Выбор теоретического закона распределения ПН, определение его параметров, построение интегральной F(t) и дифференциальной f (t) функций;
6. Проверка совпадения опытных и теоретических законов распределения ПН;
7. Определение доверительных границ рассивания одиночных, средних значений показателя надежности и наибольших возможных ошибок переноса.

Порядок реализации приведенного выше алгоритма изложен на конкретном примере в п.7.2.

7.2. Пример обработки информации о показателях надежности

7.2.1. Исходные данные и формулировка задачи

Таблица 7.1

Доремонтные ресурсы дизельных двигателей T_1, мотто-ч.

№ двигателя	T_1	№ двигателя	T_1	№ двигателя	T_1
1	2	3	4	5	6
1	1500	24	3700	47	4470
2	1870	25	3790	48	4490
3	2010	26	3810	49	4490
4	2010	27	3900	50	4570
5	2720	28	3920	51	4600
6	2900	29	3940	52	4710
7	3020	30	3970	53	4730
8	3060	31	4000	54	4820
9	3060	32	4000	55	4850
10	3180	33	4100	56	4910
11	3200	34	4130	57	4930
12	3210	35	4130	58	4990
13	3210	36	4180	59	4990
14	3260	37	4210	60	5100
15	3300	38	4230	61	5210
16	3300	39	4260	62	5350
17	3300	40	4300	63	5400
18	3420	41	4300	64	5670
19	3460	42	4350	65	5790
20	3480	43	4370	66	5840
21	3580	44	4380	67	5900
22	3610	45	4420	68	5950
23	3620	46	4470	69	5970
				70	7800

Требуется определить среднее значение доремонтного ресурса и характеристики его рассеивания для всех двигателей данной модели, а также наибольшую возможную ошибку переноса.

7.2.2. Порядок обработки информации

1. В таблице 7.1 полученные в результате испытания показатели записаны в возрастающем порядке, т.е упорядочение исходной информации уже произведено. Это позволяет приступить к реализации следующего этапа алгоритма – построению статистического ряда информации и определению смещения начала рассеивания ПН.

2. Статистическим рядом случайной величины называется таблица, в верхней строке которой приведены в порядке возрастания ее возможные значения (интервалы значений), а в нижних – частоты и вероятности этих значений (табл.7.2).

Построение статистического ряда осуществляется в следующей последовательности:

- определяют число интервалов ряда;
- выбирают величину (ширину) одного интервала;
- подсчитывают частоту появления показателей в каждом интервале ряда;
- определяют частость (опытную вероятность) появления показателей в каждом интервале ряда;
- подсчитывают накопленную частость (опытную вероятность).

Для определения числа интервалов статистического ряда используют одно из следующих выражений:

$$n = \sqrt{N}, \tag{7.1}$$

$$n = 1 + 1,32 \cdot lgN, \tag{7.2}$$

где N – число точек (повторность) информации.

Полученный по формулам (7.1) или (7.2) результат округляют в сторону увеличения до ближайшего целого числа. Количество интервалов не должно выходить за пределы n=6-20.

В данном случае при N=70 (см.табл. 7.1.) по формуле (7.1) получим

$$n=\sqrt{70}=8.37.$$

Округляя результат до большего целого числа, получим n=9 интервалов.

Величину одного интервала статистического ряда определяют по формуле

$$A = \frac{t_{max} - t_{min}}{n}, \tag{7.3}$$

где t_{max} , t_{min} – соответственно наибольшее и наименьшее значение показателей в табл.7.1.: $t_{max} = 7800$ мото − ч, $t_{min} = 1500$ мото − ч.

Поле подстановки значений в формулу (7.3) получим

$$A = \frac{7800 - 1500}{9} = 700 \text{мото-ч.}$$

После этого приступают к построению статистического ряда исодной информации, для чего используют следующие рекомендации:

- статистический ряд состоит из четырех строк (см.табл.7.2).

В первой строке записывают интервалы значений показателей, которые должны быть равны между собой и не иметь разрывов. За начало первого интервала следует принимать наименьшее из значений в табл.7.1;

- во второй строке записывают частоту появления показателей в каждом интервале статистического ряда m_i, которую определяют подсчетом по данным табл.7.1. Если точка попадает на границу интервала, то в предыдущий к последующий интервалы записывают по 0,5 точки. Общая частота появления показателей во всех интервалах статистического ряда должна соответствовать числу показателей в табл.7.1.;

- в третьей строке статистического ряда записывают опытную вероятность появления показателя в данном интервале, определяемую по формуле

$$P_i = m_i / N, \tag{7.4}$$

где m_i- частота появления показателя в i – том интервале.

- в четвертой строке статистического ряда записывают накопленную опытную вероятность $\sum P_i$, получаемую суммированием показателей P_i, приведенных в третьей строке, в данном и предыдущих интервалах.

Например, минимальное значение в табл.7.1 t_{min}=1500 мото-ч. Его и примем за начало первого интервала статистического ряда. С учетом принятой ширины интервала А=700 мото-ч границы первого интервала от 1500 до 2200 мото-ч, второго от 2200 до 2900 мото-ч, третьего – от 2900 до 3600 мото-ч и т.д. (см.табл.7.2.).

Частота появления показателя m_i- это число точек, попавших в каждый интервал. Например, в первый интервал статистического ряда (1500-2200 мото-ч) попало 4 точки. При этом точка 1500 мто-ч совпадает с нижней границей первого интервала и следовало бы ее разделить между данным (т.е первым) и предыдущем (т.е. нулевым) интервалом по 0,5 точки. Однако, поскольку нулевой интервал отсутствует, обе половины этой точки записывают в первый интервал. Во втором интервале (2200-2900 мото-ч) две точки, одна из которых (2900 мото-ч) попадает на верхнюю границу второго интервала, по этому в нем m_i=1.5 точки, а 0,5 точки должно быть добавлено в третий интервал (см.табл.7.2.).

Опытная вероятность P_i по формуле (7.4) в первом интервале P_1=4/70=0.057$\approx$ 0.06; во втором интервале P_2=1.5/70=0.021≈0.02 и т.д. (см. табл. 7.2).

Накопленная вероятность $\sum P_i$ (четвертая строка) составляет: для первого интервала 0,06+0=0,06; для второго интервала 0,06+0,02=0,08 и т.д. Проверкой правильности вычислений, выполняемых в табл. 7.2 является:

- для первой строки статистического ряда – охват всех значений показателей, приведенных в табл. 7.1;

- для второй строки – сумма частот m_i в статистическом ряду должна соответствовать общему числу точек информации N, т.е. $\sum m_i$ =N=70 точек;

- для третьей и четвертой строк статистического ряда обязательным является соблюдение условия $\sum P_i$=1.0.

Таблица 7.2

Исходной статистический ряд информации

Интервал, тыс. мото-ч	1,5-2,2	2,2-2,9	2,9-3,6	3,6-4,3	4,3-5,0	5,0-5,7	5,7-6,4	6,4-7,1	7,1-7,8
Частота, m_i	4.0	1.5	15.5	19.0	19.0	5	5	0	1
Опытная вероятность, P_i	0,06	0,02	0,22	0,27	0,27	0,07	0,07	0	0,02
Накопленная вероятность, $\sum P_i$	0,06	0,08	0,30	0,57	0,84	0,91	0,98	0,98	1,00

Автомобиль, как сложная техническая система, и его элементы, т.е. узлы, агрегаты и детали относятся к высоконадежным объектам. Это означает, что появление значений показателей надежности близких к нулевым является маловероятным. Иными словами начало рассеивания показателей надежности будет достаточно далеко отстоять от начала координат. Этот факт характеризуется смещением начала рассеивания $t_{\text{см}}$ и определяется по формуле

$$t_{CM} = t_{1H} - 0{,}5 \cdot A, \qquad , \tag{7.5}$$

где $t_{1\text{н}}$ - значение начала первого интервала статистического ряда, мотто-ч.

В данном случае

$$t_{CM} = 1500 - 0{,}5 \cdot 700 = 1150 \text{мото-ч.}$$

3. Среднее значение показателя надежности (доремонтного ресурса) lанной группы двигателей определяется по формуле

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^{n} t_{ic} \cdot P_i, \tag{7.6}$$

где n – число интервалов статистического ряда;

t_{ic} - значение середины i-ого интервала, мото-ч;

P_i – опытная вероятность в i-ом интервале статистического ряда.

В данном случае имеем

$$\bar{t} = 1{,}85 \cdot 0{,}06 + 2{,}55 \cdot 0{,}02 + 3{,}25 \cdot 0{,}22 + 3{,}95 \cdot 0{,}27 + 4{,}65 \cdot 0{,}27 +$$
$$+5{,}35 \cdot 0{,}07 + 6{,}05 \cdot 0{,}07 + 6{,}75 \cdot 0 + 7{,}45 \cdot 0{,}02 = 4{,}146 \text{тыс.мото-ч.}$$

Среднее квадратическое отклонение показателя надежности (доремонтного ресурса) определяют следующим образом

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(t_{ic} - \bar{t}\right)^2 \cdot P_i}, \tag{7.7}$$

Для данного случая получим

$$\sigma = \sqrt{(1{,}85 - 4{,}15)^2 \cdot 0{,}06 + (2{,}55 - 4{,}15)^2 \cdot 0{,}02 + (3{,}25 - 4{,}15)^2 \cdot 0{,}22 +}$$
$$\sqrt{+(3{,}95 - 4{,}15)^2 \cdot 0{,}27 + (4{,}65 - 4{,}15)^2 \cdot 0{,}27 + (5{,}35 - 4{,}15)^2 \cdot 0{,}07 +}$$
$$\sqrt{+(6{,}05 - 4{,}15)^2 \cdot 0{,}07 + (6{,}75 - 4{,}15)^2 \cdot 0 + (7{,}45 - 4{,}15)^2 \cdot 0{,}02} = 1{,}05 \text{тыс.мото-ч.}$$

4. Проверка исходной информации на достоверность (выпадающие точки) осуществляются двумя способами:

- с помощью правила «трех сигм»;
- по критерию Ирвина.

В соответствие с правилом «трех сигм» точка информации считается достоверной, если она не выходит за пределы интервала

$$\bar{t} - 3\sigma \le t \le \bar{t} + 3\sigma. \quad (7.8)$$

Таким образом, нижняя и верхняя границы достоверности информации, приведенной в табл.7.1, составляют:

$$t_{min} = 4{,}15 - 3 * 1{,}05 = 1{,}0 \text{ тыс. мото} - \text{ч};$$
$$t_{max} = 4{,}15 + 3 * 1{,}05 = 7{,}3 \text{ тыс. мото} - \text{ч}.$$

Наименьший доремонтный ресурс двигателя T_1=1,5 тыс. мото-ч (см.табл.7.1). Поскольку 1,5$>$ 1,0 тыс. мото-ч, первая точка информации достоверна и должна учитываться в дальнейших расчетах.

Наибольший доремонтный ресурс двигателя T_1=7,8 тыс.мото-ч. Эта точка выходит за верхнюю границу достоверности ($t_{max} = 7{,}3$ тыс. мото $-$ ч), поэтому должна быть исключена из дальнейших расчетов.

Более точно как крайние, так и любые другие смежные точки информации, проверяют по формуле

$$\lambda_{ОП} = \frac{1}{\sigma} \cdot \left(t_i - t_{i-1}\right) < \lambda_T, \quad (7.9)$$

где $\lambda_{\text{оп}}$ $-$ опытное (расчетное) значение критерия;

t_i, t_{i-1} - смежные точки информации;

$\lambda_{\text{т}}$ – табличное значение критерия Ирвина.

Для крайних точек информации, получим:

$\lambda_{\text{оп}1} = \frac{1}{1.05}$*(1.87-1.50)=0.35;

$\lambda_{\text{оп}70}$=$\frac{1}{1.05}$*(7.80-5.97)=1.74.

По данным табл.5 приложения 1 при повторности информации N=70 и уровне доверительной вероятности $\lambda = 0{,}95$ значение критерия Ирвина $\lambda_{\text{т}} = 1{,}1$. Условие (7.9) выполняется для первой точки информации (T_1=1,5 мото-ч), поэтому она должна быть исключена из дальнейших расчетов.

Если проверка исключает точки информации, необходимо вновь перестроить статистический ряд, пересчитать среднее значение показателя надежности и среднее квадратическое отклонение.

Для проверенной на достоверность информации, получим:

- число интервалов статистического ряда по формуле (7.1)

$$n=\sqrt{69}=8{,}31.$$

Примем в дальнейших расчетах n=9 интервалов;

- величина одного интервала (без учета исключенной точки) по формуле (7.3)

$$A=\frac{5{,}97-1{,}5}{9}=0{,}497\text{тыс.мото-ч.}$$

В этом случае новый статистический ряд будет иметь вид, представленный в табл.7.3

Таблица 7.3.

Уточненный статистический ряд распределения доремонтного ресурса двигателя

Интервал, тыс. мотто-ч	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	5,0-5,5	5,5-6,0
Частота, m_i	2	2	2	14	11	18	10	4	6
Опытная вероятность, P_i	0,03	0,03	0,03	0,20	0,16	0,26	0,14	0,06	0,09
Накопленная вероятность, $\sum P_i$	0,03	0,06	0,09	0,29	0,45	0,71	0,85	0,91	1,00

Составленный по данным исходной информации уточненный статистический ряд дает полную характеристику опытного распределения показателя надежности.

Среднее значение доремонтного ресурса по формуле (7.6) составит

$$\bar{t}=1{,}75\cdot 0{,}03+2{,}25\cdot 0{,}03+2{,}75\cdot 0{,}03+3{,}25\cdot 0{,}20+3{,}75\cdot 0{,}16+$$
$$+4{,}25\cdot 0{,}26+4{,}75\cdot 0{,}14+5{,}25\cdot 0{,}06+5{,}75\cdot 0{,}09=4{,}05\text{тыс.мото-ч.}$$

Среднее квадратическое отклонение показателя надежности по формуле (7.7)

$$\sigma = \sqrt{(1,75-4,05)^2 \cdot 0,03 + (2,25-4,05)^2 \cdot 0,03 + (2,75-4,05)^2 \cdot 0,03 +}$$
$$\sqrt{+(3,25-4,05)^2 \cdot 0,2 + (3,75-4,05)^2 \cdot 0,16 + (4,25-4,05)^2 \cdot 0,26 +}$$
$$\sqrt{+(4,75-4,05)^2 \cdot 0,14 + (5,25-4,05)^2 \cdot 0,06 + (5,75-4,05)^2 \cdot 0,09} = 0,925 \text{тыс.мото-ч.}$$

5. Для повышения точности расчета показателей надежности опытную информацию выравнивают (заменяют) теоретическим законом распределения. Выбор теоретического закона для выравнивания осуществляют:

- визуально на основе наилучшего совпадения между полигоном распределения и кривой накопленных опытных вероятностей, а также формой графиков дифференциальной и интегральной функций предполагаемого для выравнивания теоретического закона распределения;
- по величине коэффициента вариации;
- на основе наилучшего совпадения точек опытного и теоретического закона распределения;
- по критериям согласия.

Для выбора теоретического закона визуальным способом по данным статистического ряда строят гистограмму, полигон и кривую накопленных опытных вероятностей (рис.7.1, рис 7.2).

Для построения гистограммы и полигона распределения доремонтного ресурса по оси абсцисс откладывают интервалы значений показателя, а по оси ординат – частоту m_i или опытную вероятность P_i (рис. 7.1). При построении графика кривой накопленной опытной вероятности по оси ординат откладывают значение $\sum P_i$ (рис. 7.2).

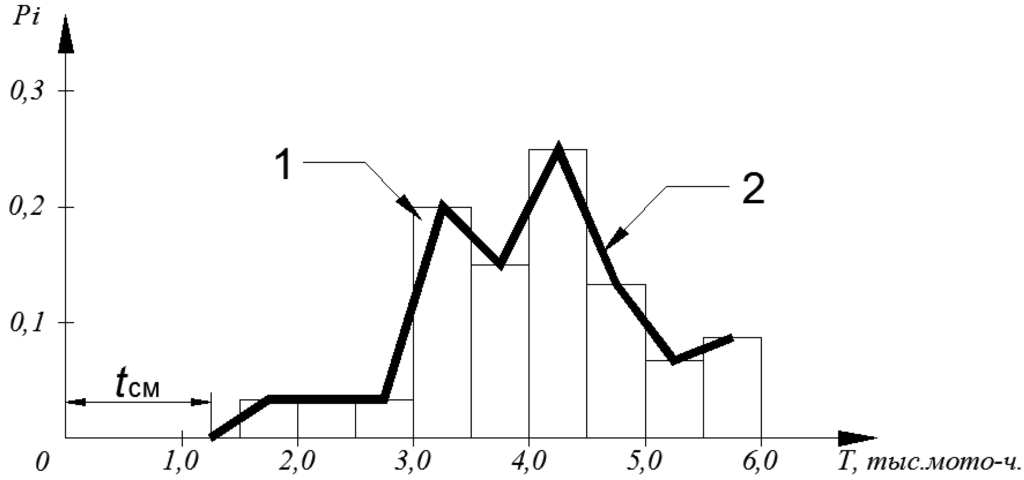

Рис. 7.1. – Гистограмма и полигон распределения доремонтного ресурса: 1 – гистограмма; 2 – полигон распределения.

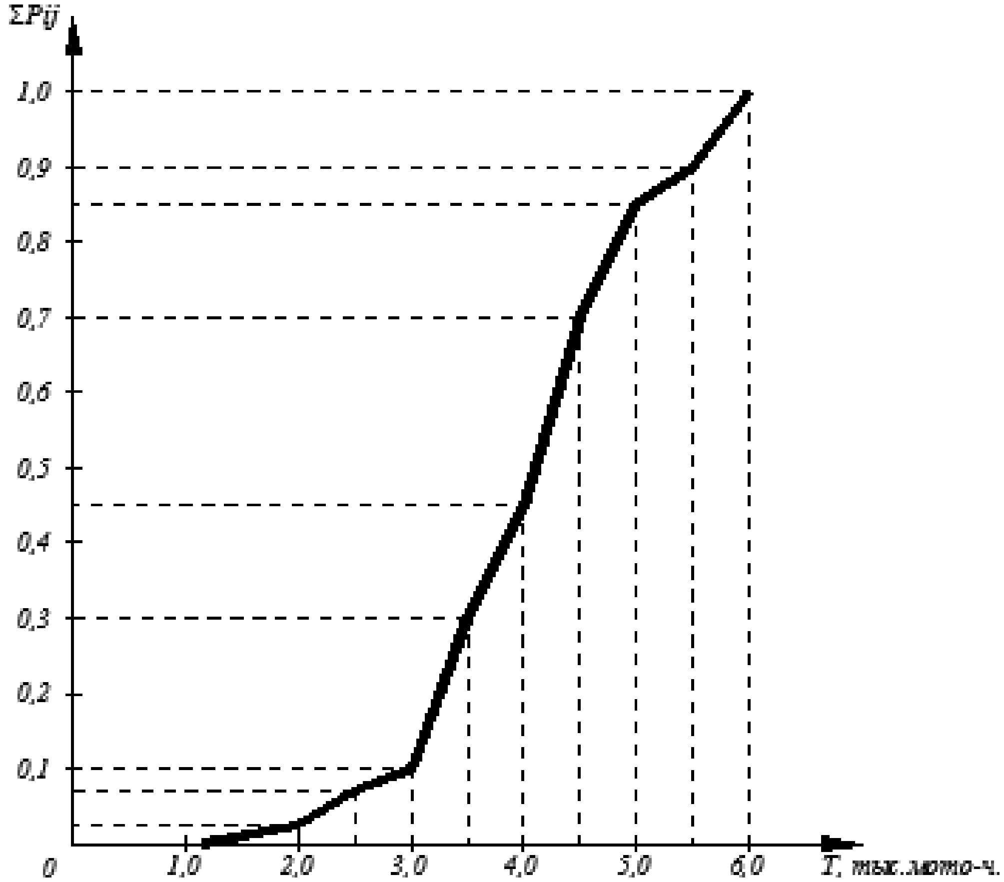

Рис. 7.2. – Кривая накопленных опытных вероятностей.

Полигон распределения является статистическим аналогом дифференциальной, а кривая накопленных опытных вероятностей – интегральной функций теоретического закона распределения. Сравнивая визуально построенные графики с аналогичными графиками известных теоретических законов, можно выбрать наиболее похожие по форме кривых и отсеять заведомо не подходящие. Разумеется, что такой метод относится к числу очень приближенных, поэтому его используют на начальном этапе выбора теоретического закона распределения.

Выбор теоретического закона распределения можно осуществить по величине коэффициента вариации, определяемого по формуле

$$\upsilon = \frac{\sigma}{\bar{t} - t_{CM}}. \tag{7.10}$$

Для данного случая, получим

$$\upsilon = \frac{0,925}{4,05 - 1,25} = 0,33.$$

Если значения коэффициента находятся в пределах:

- $\nu < 0.3$ - выбирают закон нормального распределения (ЗНР);
- 0.7$> \nu > 0.5$ - выбирают закон распределения Вейбулла (ЗРВ);
- 0.5$\nu > 0.3$ – выбирают тот из законов (ЗНР или ЗРВ), который обеспечивает лучшее совпадение между опытными данными и теоретическим законом распределения;
- 1.1$> \nu >$0.7 – принимают экспоненциальный закон распределения (ЭЗР).

Поскольку расчетное значение коэффициента вариации ($\nu = 0{,}33$) входит в диапазон значений 0,7$> \nu > 0{,}3$, однозначный выбор теоретического закона распределения для выравнивания опытной информации также не представляется возможным.

Значительно большие возможности выбора теоретического закона распределения для выравнивания опытной информации дает третий метод, основанный на наилучшем совпадении точек опытного и теоретического распределения. Его реализуют в следующей последовательности:

- пользуясь одним или одновременно обоими из описанных выше методов предварительно выбирают один или несколько теоретических законов, которые могут быть использованы для выравнивания опытной информации;

- приняв расчетные параметры опытного распределения в качестве параметров предварительно выбранных для выравнивания теоретических законов, для каждого интервала статистического ряда, вычисляют значения точек дифференциальных и интегральных функцией теоретических законов;

- нанося полученные точки на графики полигона распределения и кривой накопленных опытных вероятностей (рис.7.1;7.2), визуально определяют степень совпадения между опытными и теоретическими точками;

- для выравнивания принимают тот закон, который обеспечивает наилучшее совпадение опытных и теоретических точек.

В частности, ранее было установлено, что для выравнивания опытной информации могут быть использованы ЗНР и ЗРВ.

Закон нормального распределения характеризуется дифференциальной f(t) и интегральной F(t) функциями, которые имеют следующий вид:

- дифференциальная функция ЗНР

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{\left(t-\bar{t}\right)^2}{2\sigma^2} \right], \tag{7.11}$$

- интегральная функция ЗНР

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int\limits_0^\infty \exp\left[-\frac{\left(t-\bar{t}\right)^2}{2\sigma^2} \right] dt, \tag{7.12}$$

где t – текущее значение показателя надежности;

$\bar{t}$ – математическое ожидание (среднее значение) показателя надежности;

σ – среднее квадратическое отклонение.

Величины $\bar{t}$ и σ являются параметрами ЗНР. Их значения уже известны и составляют: $\bar{t}$=4,05 тыс. мото-ч; σ=0,925 тыс. мото-ч.

Закон распределения Вейбулла также характеризуется двумя функциями:

- дифференциальная функция ЗРВ

$$f(t)=\frac{b}{a}\cdot\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}\cdot\exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right], \tag{7.13}$$

- интегральная функция ЗРВ

$$F(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right], \tag{7.14}$$

где а, в – параметры закона распределения Вейбулла.

Использование выражений (7.11) и (7.12) для прямых вычислений затруднено, поэтому значение обоих функций определяют с использованием специальных таблиц.

Значение дифференциальной функции ЗНР в середине каждого из интервалов статистического ряда определяют по формуле

$$f(t_{ic})=\frac{A}{\sigma}\cdot f_0\left(\frac{t_{ic}-\bar{t}}{\sigma}\right), \tag{7.15}$$

где $f_0\left(\frac{t_{ic}-\bar{t}}{\sigma}\right)$ – табличное значение дифференциальной функции ЗНР от аргумента, стоящего в скобках (табл.2);

t_{ic} - значение показателя надежности в середине i - ого интервала статистического ряда в табл.7.3.

При этом

$$f_0(-t)=f_0(t). \tag{7.16}$$

Значения интегральной функции ЗНР в конце каждого из интервалов статистического ряда определяют по выражению

$$F\left(t_{ic}\right)=F_0\left(\frac{t_{ik}-\bar{t}}{\sigma}\right), \qquad (7.17)$$

где $F_0\left(\frac{t_{ik}-\bar{t}}{\sigma}\right)$ – табличное значение интегральной функции ЗНР от аргумента, стоящего в скобках;

t_{ik} – значение показателя надежности в конце i-ого интервала статистического ряда в табл.7.3.

При этом

$$F_0\left(-t\right)=1-F_0\left(t\right). \qquad (7.18)$$

Для статистического ряда, представленного в табл.7.3, значения дифференциальной функции ЗНР составят:

- для середины первого интервала статистического ряда

$$f\left(1,75\right)=\frac{0,5}{0,925}\cdot f_0\left(\frac{1,75-4,05}{0,925}\right)=0,54\cdot f_0\left(-2,49\right)=0,54\cdot f_0\left(2,49\right).$$

По данным табл. 2 приложения 1 находим $f_0(2,49)$=0,02. Тогда середины

$$f\left(1,75\right)=0,54\cdot 0,02=0,01;$$

- для середины второго интервала

$$f\left(2,25\right)=\frac{0,5}{0,925}\cdot f_0\left(\frac{2,25-4,05}{0,925}\right)=0,54\cdot f_0\left(-1,94\right)=0,54\cdot f_0\left(1,94\right).$$

По данным табл.2 приложения 1 находим f_0(1,94)=0,06. Тогда

$$f\left(2,25\right)=0,54\cdot 0,06=0,03;$$

- для середины третьего интервала

$$f\left(2,75\right)=\frac{0,5}{0,925}\cdot f_0\left(\frac{2,75-4,05}{0,925}\right)=0,54\cdot f_0\left(-1,40\right)=0,54\cdot f_0\left(1,40\right).$$

По данным табл. 2 приложения 1 находим $f_0(1{,}40)$=0,15. Тогда

$$f\left(2,75\right)=0,54\cdot 0,15=0,08.$$

Результаты вычислений остальных значений дифференциальной функции ЗНР приведены в табл.7.4

Значения интегральной функции ЗНР составят:

- для первого интервала статистического ряда

$$F_0\left(2,0\right)=F_0\left(\frac{2,0-4,05}{0,925}\right)=F_0\left(-2,22\right)=1-F_0\left(2,22\right).$$

По данным табл. 3 приложения 1 имеем F_0(2,22)=0.99. Тогда

$$F_0\left(2,0\right)=1-0,99=0,01;$$

- для конца второго интервала

$$F_0\left(2,5\right)=F_0\left(\frac{2,5-4,05}{0,925}\right)=F_0\left(-1,68\right)=1-F_0\left(1,68\right).$$

По данным табл. 3 приложения 1 имеем F_0(1,68)=0,95. Тогда

$$F_0\left(2,5\right)=1-0,95=0,05.$$

- для конца третьего интервала

$$F_0\left(3,0\right)=F_0\left(\frac{3,0-4,05}{0,925}\right)=F_0\left(-1,13\right)=1-F_0\left(1,13\right).$$

По данным табл. приложения 1 имеем F_0(1,13)=0,87. Тогда

$$F_0\left(3,0\right)=1-0,87=0,13.$$

Результаты вычислений значений интегральной функции ЗНР для остальных интервалов статистического ряда приведены в табл.7.4

Таблица 7.4

Опытные и теоретические значения распределения доремонтных ресурсов двигателей

Интервал, (тыс.мото ч.)	Опытная вероятность P_i	Дифференциальная Функция, fi		Вероятность, $\sum Pi$	Интегральная функция, Fi	
		ЗНР	ЗРВ		ЗНР	ЗРВ
1.5-2.0	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
2.0-2.5	0.03	0.03	0.04	0.06	0.05	0.05
2.5-3.0	0.03	0.08	0.10	0.09	0.13	0.15
3.0-3.5	0.20	0.15	0.15	0.29	0.28	0.30
3.5-4.0	0.16	0.20	0.19	0.45	0.48	0.49
4.0-4.5	0.26	0.20	0.20	0.71	0.68	0.69
4.5-5.0	0.14	0.17	0.16	0.85	0.85	0.85
5.0-5.5	0.06	0.09	0.09	0.91	0.94	0.94
5.5-6.0	0.09	0.04	0.04	1.00	0.98	0.98

Выражения (7.13) и (7.14) для определения значений дифференциальной и интегральной функции ЗРВ также достаточно сложны, поэтому для вычислений используют таблицы. При этом для определения значений дифференциальной функции используют выражение

$$f\left(t_{ic}\right)=F\left(t_{ik}\right)-F\left(t_{iн}\right), \tag{7.19}$$

где $F\left(t_{ik}\right), F\left(t_{iн}\right)$ – значение интегральной функции в конце и в начале i- ого интервала статистического ряда.

Для вычисления значений интегральной функции ЗРВ предварительно определяют его параметры: $t_{СМ}$, а и в.

Значение параметра в, а также вспомогательных коэффициентов Кв и Св определяют по данным табл. 5 и Приложения 1 по велечине коэффициента вариации ν=0,33: в=3,34; Кв=0,9; Св=0,3.

Значение параметра а определяется по одной из следующих формул:

$$a=\sigma/C_в, \tag{7.20}$$

$$a = \left(t - t_{см}\right) / K_{в}. \qquad (7.21)$$

Тогда, по формуле (7.20) получим

$$a = 0,925 / 0,3 = 3,08 \text{ тыс.мото-ч.}$$

Значение интегральной функции определяют по данным табл. 7 приложения 1 по величине параметра в и значению отношения

$$\left(t_{ik} - t_{см}\right) / a. \qquad (7.22)$$

Например, значение интегральной функции в конце первого интервала статистического ряда

$$\frac{\left(t_{1k} - t_{см}\right)}{a} = \frac{2,0 - 1,25}{3,08} = 0,24.$$

По данным табл. 7 приложения 1 найдем $F\left(t_{ik}\right) = F_{m}\left(0,24\right)$ при в=3,34 равно 0,01, т.е. $F_{1k} = 0,01$.

Для конца второго интервала статистического ряда

$$\frac{\left(t_{2k} - t_{см}\right)}{a} = \frac{2,5 - 1,25}{3,08} = 0,41.$$

По данным табл. 7 приложения 1 по величине данного отношения и в=3,34 имеем $F_{2k} = 0,05$.

Для конца третьего интервала статистического ряда

$$\frac{\left(t_{3k} - t_{см}\right)}{a} = \frac{3,0 - 1,25}{3,08} = 0,57.$$

По данным табл. 7 приложения 1 по величине данного отношения и в=3,34 имеем $F_{3k} = 0,15$.

Значения интегральной функции ЗРВ для остальных интервалов статистического ряда приведены в табл. 7.4.

Значения дифференциальной функции в серединах интервалов статистического ряда в соответствии с выражением (7.19) составят:

- для первого интервала

$$f(t_{1c}) = 0,01 - 0 = 0,01;$$

- для второго интервала

$$f(t_{2c}) = 0,05 - 0,01 = 0,04;$$

- для третьего интервала

$$f(t_{3c}) = 0,15 - 0,05 = 0,10.$$

Результаты вычислений значений дифференциальной функции ЗРВ для других интервалов статистического ряда приведены в табл.7.4.

Полученные в результате расчетов значения точек дифференциальных функций ЗНР и ЗРВ наносятся на график полигона распределения доремонтных ресурсов двигателей, а точек интегральных функций этих законов – на график кривой накопленных опытных вероятностей (см. рис.7.1 и 7.2). Сравнения показывают, что функции обоих законов распределения мало отличаются друг от друга и опытных кривых, поэтому выбрать какой либо из них визуально не представляется возможным. Это объясняется тем, что в интервале значений коэффициента вариации ν = 0.3 - 0.5 функции ЗНР и ЗРВ практически совпадают между собой.

6. В том случае, когда описанные выше методы выбора теоретического закона распределения не дают желаемого результата, выбор осуществляют по критериям согласия. При этом чаще всего для этой цели используют критерий согласия Пирсона x^2, представляющий собой сумму квадратов отклонений опытных и теоретических частот в каждом интервале статистического ряда, т .е x^2, представляющий собой сумму квадратов отклонений опытных и теоретических частот в каждом интервале статистического ряда, т.е

$$x^2 = \sum_{1}^{n_y} \frac{(m_i - m_{\text{T}i})^2}{m_{\text{T}i}}, \tag{7.23}$$

где n_y – число интервалов укрупененного статистического ряда;

m_i – опытная частота появления показателя в i- ом интервале статистического ряда;

$m_{\text{T}i}$ – теоретическая частота в i-ом интервале, которую определяют по формуле (7.24)

$$m_{\text{T}i} = N\left[F(t_{ik}) - F(t_{iн})\right], \tag{7.24}$$

где N – количество точек информации;

$F(t_{ik}), F(t_{iн})$ – значения интегральных функций соответственно в конце и в начале i-ого интервала укрупненного статистического ряда.

Укрупненный статистический ряд информации строят, объединяя отдельные интервалы исходного статистического ряда (см.табл.7.3) так, чтобы он отвечал следующим условиям: $n_y \geq 4$; $m_i \geq 5$. Указанным условиям отвечает укрупненный статистический ряд, приведенный в табл.7.5.

Таблица 7.5

Укрупненный статистический ряд информации

Интервал, тыс.мото-ч	Опытная частота, m_i	Теоретическая частота, $m_{Тi}$	
		ЗНР	ЗРВ
1,5-3,5	20	19,32	20,70
3,5-4,5	29	28,29	27,60
4,5-5,0	10	11,04	10,35
5,0-6,0	10	8,97	8,97

Опытную частоту m_i подсчитывают по данным исходной информации (см. табл.7.1), не учитывая исключенную точку.

Теоретическую частоту $m_{Тi}$ при ЗНР подсчитывают с учетом выражений (7.17) и (7.18):

- для конца первого интервала укрупненного статистического ряда

$$m_{Т1} = N \cdot F_0\left(\frac{3,5-4,05}{0,925}\right) = 69 \cdot (-0,59) = 69\left[1 - F_0(0,59)\right] =$$

$$= 69\left[1-0,72\right] = 69 \cdot 0,28 = 19,32;$$

- для конца второго интервала укрупненного статистического ряда

$$m_{Т2} = 69 \cdot F_0\left(\frac{4,5-4,05}{0,925}\right) - m_{T1} = 69 \cdot F_0(0,49) - 19,32 =$$

$$= 69 \cdot 0,69 - 19,32 = 47,61 - 19,32 = 28,29;$$

- для конца третьего интервала

$$m_{Т3} = 69 \cdot F_0\left(\frac{5,0-4,05}{0,925}\right) - 47,61 = 69 \cdot F_0(1,03) - 47,61 =$$

$$= 69 \cdot 0,85 - 47,61 = 58,65 - 47,61 = 11,04;$$

- для конца последнего интервала

$$m_{T3}4 = 69 \cdot F_0\left(\frac{6,0-4,05}{0,925}\right) - 58,65 = 69 \cdot F_0(2,11) - 58,65 =$$
$$= 69 \cdot 0,98 - 58,65 = 67,62 - 58,65 = 8,97.$$

Результаты расчетов теоретических частот для ЗНР приведены в табл.7.5.

Для ЗРВ интегральную функцию для расчета теоретической частоты определяют по данным табл. 7 приложения 1, вход в которую осуществляют по значению в=3,34 и величине отношения $\frac{t_{ik} - t_{см}}{a}$:

- для конца первого интервала укрупненного статистического ряда

$$m_{T1} = 69 \cdot F_0\left(\frac{3,5-1,25}{3,08}\right) = 69 \cdot F_0(0,73) = 69 \cdot 0,3 = 20,7;$$

- для конца второго интервала

$$m_{T2} = 69 \cdot F_0\left(\frac{4,5-1,25}{3,08}\right) - 20,7 = 69 \cdot F_0(1,06) - 20,7 = 27,6;$$

- для конца третьего интервала

$$m_{T3} = 69 \cdot F_0\left(\frac{5,0-1,25}{3,08}\right) - 48,3 = 69 \cdot F_0(1,22) - 48,3 = 69 \cdot 0,85 - 48,3 =$$
$$= 58,65 - 48,30 = 10,35;$$

- для конца четвертого интервала

$$m_{T4} = 69 \cdot F_0\left(\frac{6,0-1,25}{3,08}\right) - 58,65 = 69 \cdot F_0(1,54) - 58,65 = 69 \cdot 0,98 - 58,65 =$$
$$= 67,62 - 58,65 = 8,97.$$

Результаты расчетов теоретических частот для ЗРВ приведены в табл 7.5.

По формуле (7.23) и данным табл. 7.5 определяем значения критерия Пирсона:

- для закона нормального распределения

$$x^2 = \frac{(20-19,32)^2}{19,32} + \frac{(29-28,29)^2}{28,29} + \frac{(10-11,04)^2}{11,04} + \frac{(10-8,97)^2}{8,97} = 0,26;$$

- для закона распределения Вейбулла

$$x^2 = \frac{(20-20,7)^2}{20,7} + \frac{(29-27,6)^2}{27,6} + \frac{(10-10,35)^2}{10,35} + \frac{(10-8,97)^2}{8,97} = 0,26;$$

Сравнивая значения критериев согласия, полученные для ЗНР иЗРВ, можно заключить, что оба закона примерно в равной мере приемлемы для выравнивания данной опытной информации.

Пользуясь критерием Пирсона можно определить вероятность совпадения опытных и теоретических данных. Для этого определяю число степеней свободы r по формуле

$$r = n_y - \mathrm{k}, \quad (7.25)$$

где К – число обязательных связей для рассматриваемых теоретических законов.

Для ЗНР этими связями являются:

$$\bar{t}, \sigma \text{ и } \sum P_i = 1, \text{ т.е. } k = 3.$$

Для ЗРВ связями являются:

$$a, b \text{ и } \sum P_i = 1, \text{ т.е. } k = 3.$$

Таким образом для обоих законов имеем

$$r = 4 - 3 = 1.$$

Значение r обозначает также номер строки в табл. 10 приложение 1. По данным указанной таблицы в первой строке интерполированием находим значения критериев x^2=0.26 и x^2=0.22. В верхней строке находим вероятность совпадения Р%:

- для ЗНР Р=62%;

- для ЗРВ Р=65%.

Таким образом, вероятность совпадения опытных данных с теоретическими для обоих законов является примерно одинаковой, что говорит о возможности принятия для выравнивания любого из них.

7. Если было произведено наблюдение за N объектами и на этой основе определено среднее значение показателя надежности $\bar{t}$ и среднее квадратическое отклонение σ, то отдельные значения этого же показателя с вероятностью Р≈1,0 могут в крайних случаях отличаться от $\bar{t}$ на величину ±3σ при ЗНР и на величину от 0,1а до до 2,5а – при ЗРВ. На практике такая высокая степень доверия расчета (доверительная вероятность) является излишней и ее ограничивают значениями доверительных вероятностей: α=0,80; 0,9; 0,95; 0,99. Границы, в которых могут колебаться значения отдельных показателей

надежности при заданном уровне доверительной вероятности α, называются нижней доверительной границей t_α^H и верхней доверительной границей t_α^B.

При ЗНР нижняя и верхняя доверительные границы рассеивания одиночных показателей надежности определяют по формулам:

$$t_\alpha^H = \bar{t} - t_\alpha \cdot \delta; \qquad (7.26)$$

$$t_\alpha^B = \bar{t} + t_\alpha \cdot \delta; \qquad (7.27)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента при заданной доверительной вероятности α.

Например, для ЗНР при α=0,9 и N= 69 по данным табл. 11 приложения значение коэффициента Стьюдента составляет t_α=1,67. Тогда, по формулам (7.26) и (7.27) получим:

$$t_\alpha^H = 4{,}05 - 1{,}67 \cdot 0{,}925 = 2{,}50\, тыс. мото - ч;$$

$$t_\alpha^B = 4{,}05 + 1{,}67 \cdot 0{,}925 = 5{,}59\, тыс. мото - ч.$$

Доверительные границы рассеивания одиночных показателей надежности при ЗРВ определяют по уравнениям:

$$t_\alpha^H = H_K^B\left(\frac{1-\alpha}{2}\right) \cdot a + t_{см}; \qquad (7.28)$$

$$t_\alpha^B = H_K^B\left(\frac{1+\alpha}{2}\right) \cdot a + t_{см}. \qquad (7.29)$$

где H_K^B- квантиль ЗРВ от аргумента, заключенного в скобки.

Значение H_K^B определяют по данным табл. 9 приложения , входом в которую является параметр в и величины $\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)$ или $\left(\frac{1+\alpha}{2}\right)$.

Например, при α=0,9; в=3,34; а=3,08 тыс. мото-ч и $t_{см}$ = 1,25 тыс. мото-ч получим:

$$t_\alpha^H = H_K^B\left(\frac{1-0{,}9}{2}\right) \cdot 3{,}08 + 1{,}25 = 2{,}51\, тыс. мото - ч;$$

$$t_\alpha^B = H_K^B\left(\frac{1+0{,}9}{2}\right) \cdot 3{,}08 + 1{,}25 = 5{,}56\, тыс. мото - ч.$$

Если в тех же условиях провести испытания других 69 двигателей, то среднее значение их доремонтного ресурса $\bar{t}$ и среднее квадратическое отклонение σ изменятся. Для того, чтобы установить, в каких пределах может изменяться среднее значение показателя надежности, определяют нижнюю и верхнюю границы его рассеивания.

Для ЗНР нижнюю и верхнюю доверительные границы рассеивания среднего значения показателя надежности определяют по формулам :

$$\bar{t}_{\alpha}^{н} = \bar{t} - t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \tag{7.30}$$

$$\bar{t}_{\alpha}^{в} = \bar{t} + t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \tag{7.31}$$

Для данного случая при α=0,9; N=69; t_{α}=1,67; $\bar{t}$=4,05 тыс. мото-ч и σ=0,925 тыс.мото-ч получим:

$$\overline{t_{\alpha}^{Н}} = 4{,}05 - 1{,}67 \cdot \frac{0{,}925}{\sqrt{69}} = 3{,}89\ тыс.мото - ч;$$

$$\overline{t_{\alpha}^{В}} = 4{,}05 + 1{,}67 \cdot \frac{0{,}925}{\sqrt{69}} = 4{,}24\ тыс.мото - ч;$$

Для ЗРВ нижнюю и верхнюю доверительные границы рассеивания среднего значения показателя надежности вычисляют следующим образом:

$$\bar{t}_{\alpha}^{н} = \left(\bar{t} - t_{см}\right) \cdot \sqrt[в]{r_3} + t_{см}; \tag{7.32}$$

$$\bar{t}_{\alpha}^{в} = \left(\bar{t} - t_{см}\right) \cdot \sqrt[в]{r_1} + t_{см}, \tag{7.33}$$

где r_3, r_1- коэффициент распределения Вейбулла, определяемые по табл. 11 приложения 1 в зависимости от доверительной вероятности α и числа точек информации N.

Для ЗВР при α=0,9; N=69; $t_{см}$=1,67; $\bar{t}$=4,05 тыс.мото-ч и r_1=1,23 и r_3= 0,83 получим:

$$\bar{t}_{\alpha}^{н} = \left(4{,}05 - 1{,}25\right) \cdot \sqrt[3{,}34]{0{,}83} + 1{,}25 = 3{,}90 тыс.мото - ч;$$

$$\bar{t}_{\alpha}^{в} = \left(4{,}05 - 1{,}25\right) \cdot \sqrt[3{,}34]{1{,}23} + 1{,}25 = 4{,}23 тыс.мото - ч;$$

При переносе полученных числовых значений показателя надежности с ограниченного количества испытуемых двигателей на все двигатели данной марки возникает ошибка, которую оценивают показателям, называемым наибольшая возможность ошибка переноса и определяемые из выражения

$$e_{\alpha} = t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \tag{7.34}$$

где e_{α}- наибольшая абсолютная ошибка переноса

Так, для N=69; t_{α}=1,67; σ=0,925 тыс.мото-ч получим:

$$e_{\alpha} = 1,67 \cdot \frac{0,925}{\sqrt{69}} = 0,19 \text{ тыс. мото-ч.}$$

Ее следует отложить влево и вправо от среднего значения показателя надежности($\bar{t}$=4,05 тыс.мото-ч)

Более удобно пользоваться показателем, который называется относительная предельная ошибка переноса и определяемым в процентах от среднего значения показателя надежности по формуле

$$\delta = \frac{\bar{t}_{\alpha}^{в} - \bar{t}}{\bar{t} - t_{CM}} \cdot 100, \tag{7.35}$$

где $\bar{t}_{\alpha}^{B}$ - верхняя доверительная граница среднего значения показателя надежности, вычисленная при односторонней доверительной вероятности $\alpha_0 = 0,9$ ($t_{\alpha}^{0} = 1,29$).

При $\bar{t}_{\alpha}^{в} = 4,2$ тыс. мото-ч, $\bar{t} = 4,05$ тыс. мото-ч и $t_{CM} = 1,25$ тыс. мото-ч получим

$$\delta = \frac{4,2 - 4,05}{4,05 - 1,25} \cdot 100 = 5,3\%.$$

7.3. Задание к работе№7

7.3.1. Задание 1

В результате испытаний получена информация о доремонтных ресурсах 100 коробок передач автомобиля Audi A6 2.6 (6V-2,598-150-5M), приведенная в таблице 7.6.

Таблица 7.6

Информация о доремонтных ресурсах коробок передач Т, тыс.км

Номер опыта	$T, тыс.км$	Номер опыта	$T, тыс.км$	Номер опыта	$T, тыс.км$	Номер опыта	$T, тыс.км$	Номер опыта	$T, тыс.км$
1	87	21	82	41	88	61	108	81	84
2	85	22	111	42	90	62	95	82	105
3	91	23	115	43	101	63	99	83	110
4	94	24	99	44	95	64	92	84	102
5	102	25	96	45	93	65	100	85	104
6	80	26	101	46	92	66	118	86	107
7	75	27	115	47	88	67	103	87	120
8	102	28	100	48	94	68	102	88	108
9	99	29	97	49	98	69	89	89	107
10	101	30	91	50	99	70	90	90	98
И	100	31	87	51	102	71	94	91	96
12	120	32	116	52	101	72	106	92	106
13	122	33	121	53	122	73	112	93	110
14	101	34	101	54	99	74	122	94	115
15	88	35	123	55	97	75	100	95	95
16	80	36	97	56	95	76	92	96	109
17	97	37	95	57	105	77	93	97	111
18	92	38	88	58	112	78	82	98	103
19	91	39	104	59	116	79	111	99	88
20	94	40	111	60	118	80	102	100	108

Определить: среднее значение доремонтного ресурса и характеристики его рассеивания для всех коробок передач данной модели автомобилей, а также наибольшую ошибку переноса.

7.3.2. Задание 2.

В результате наблюдения за ремонтом 75 термостатов двигателей автомобилей ГАЗ-31105(ЗМЗ-4062 ОД-4L-2, 3-121-5М) получены данные, представлены в таблице 7.7 в виде статического ряда.

Таблица 7.7

Данные о наработке термостатов до отказа Т,тыс.км

Наработка до отказа, тыс.км	Интервалы значений наработки Т, тыс.км									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
Частота, m_i	1	1	0	5	10	16	19	15	7	1

Определить: среднюю наработку термостатов до отказа, характеристики ее рассеивания (дисперсию, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации), а также закон распределения наработки до отказа.

7.4. Контрольные вопросы к работе№7

1. Дайте определение понятиям: испытания, программа испытаний, методика испытаний, план испытаний.
2. Назовите известные вам шифры планов испытаний на надежность и объясните их отличия.
3. Какова общая наследовательность обработки статистических данных, полученных в результате испытаний объектов на надежность?
4. Что называют статистическим рядом информации?
5. Как определить среднее значение показателя надежности, дисперсию, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации при наличии статистического ряда информации?
6. Какие способы проверки исходной информации на достоверность (выпадающей точки) вам известны?
7. Назовите способы выбора теоретического закона распределения для выравнивания опытной информации. С какой целью осуществляют выравнивание исходной информации?
8. Что такое гистограмма, полигон распределения и кривая накопленных опытных вероятностей?

9. В чем заключается сущность использования критерия согласия Пирсона для оценки совпадения опытных данных с теоретическим законом распределения?

10. Что называют доверительным границами рассеивания показателя надежности?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безотказность и надежность технических систем / Л.Н. Александровская, И.З. Аронов, В.И. Круглов и др.: Учебное пособие – М.: Университетская книга, Логос, 2008-376с.
2. Вентцель Е.С., Овчеров Л.А. Теорий вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.-480 с.
3. Гурвич И.Б., Сыркин П.Э. Эксплуатационныя надежность автомобильных двигателей. – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
4. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд.-во Стандартов, 1990. – 29 с.
5. ГОСТ 16504 – 81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины о определения. – М.: Изд.-во Стандвртов, 1991. - 48 с.
6. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2007.-19 с.
7. Острейковский В.А. Теория надежности: Учеб. для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
8. Селиванов А.И., Артемьев Ю.Н. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники. – М.: «Колес», 1978. – 248 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Коэффициенты Ирвина λ_T

Повторность информации N	λ при α=0,95	λ при α=0,99	Повторность информации *N*	λ при α=0,95	λ при α=0,99
2	2,8	3,7	30	1,2	1,7
3	2,2	2,9	50	1,1	1,6
10	1,5	2,0	100	1,0	1,5
20	1,3	1,8	400	0,9	1,3

Таблица 2

Значения функции $\phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\ e^{-x^2/2}$

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	3989	3989	3988	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	0,	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	0,	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	0,	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3725	3712	3697
0,4	0,	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	0,	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	0,	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	0,	3123	3101	5079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	0,	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	0,	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,	2420	2396	2371	2347	2323	9291	2275	2251	2227	2203
1,1	0,	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	0,	1942	1919	1395	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,3	0,	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	0,	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	0,	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	0,	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0,0	9405	9246	9089	8933	8780	8628	8478	8329	8183	8038
1,8	0,0	7895	7754	7614	7477	7341	7206	7074	6943	6814	6687
1,9	0,0	6562	6438	6316	6195	6077	5959	5844	5730	5618	5508
2,0	0,0	5399	5292	5186	5082	4980	4879	4780	4682	4586	4491
2,1	0,0	4398	4307	4217	4128	4041	3955	3871	3788	3706	3626
2,2	0,0	3547	3470	3394	3319	3946	3174	3103	3034	2965	2898
2,3	0,0	2833	2768	2705	2643	2582	2522	2463	2406	2349	2294
2,4	0,0	2239	2186	2134	2033	2033	1984	1936	1888	1842	1791
2,5	0,0	1753	1709	1667	1625	1585	1545	1506	1468	1431	1394
2,6	0,0	1358	1324	1 239	1256	1223	1191	1160	1130	1100	1071
2,7	0,0	1042	1014	0987	0961	0935	0909	0885	0861	0837	0814
2,8	0,00	7915	7696	7483	7274	7071	6873	9679	6491	6307	6127
2,9	0,00	5952	5782	5616	5454	5295	5145	4993	4647	4705	4567
3,0	0,00	4432	4301	4173	4049	3928	3810	3593	3584	3475	3370
3,	0,00	4432	3257	2384	1723	1232	0873	0612	5425	0292	0199
4,	$0,0^3$	1338	0893	0589	0385	0249	0160	0101	0064	0040	0024
5,	$0,0^5$	1487	0897	0536	0317	0136	0108	0062	0035	0020	0011

Таблица 3

Значение функции $F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	o,	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,	6551	6594	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	7321	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	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	0320	0490	0658	0824	0988	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	4855	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,7	0,9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246	6327
1,8	0,9	5407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
1,9	0,9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7588	7615	7670
2,0	0,9	7725	7778	7831	7882	7932 1	7982	8030	80771	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

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	56031	5731	5855	5975	6093	6207	6310	6427
2,7	0,99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282	7365
2,8	0,99	7445	7523	7509	7673	7774	7814	7882	7948	8012	8074
2,9	0,99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559	8605
3,0	0,99	8650	8694	8736	8777	881	8856	8893	8930	8965	8999
3,1	0 93	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2378	2636	2886
3,2	0,93	3129	33631	3590	3810	4022	4230	4429	4623	4810	4991
3,3	0,93	5166	5335	5499	5658	5811	5959	6103	6242	6376	6505
3,4	0 93	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7398	7493	7585
3,5	0,93	7674	7760	7842	7922	7999	8074	8146	8215	8282	8347
3,6	0.93	8409	8409	8527	8583	8637	8689	8739	8787	8834	8879
3,7	0.93	8922	8964	9004	9043	9080	9116	9150	1849	9216	9247
3,8	0,94	2765	3052	3327	3593	3848	4094	4331	4558	4777	4988
3,9	0,94	5190	5385	5573	5753	5926	6092	6252	6406	6554	6696
4,0	0,94	6833	6961	7090	7211	7327	7439	7546	7649	7748	7843
4,1	0.94	7934	8022	8106	8186	8264	8338	8409	8477	8542	8606
4,2	0,94	8665	8723	8778	8832	8882	8931	8978	9023	9066	9107
4,3	0,94	1460	1837	2198	2544	2876	3193	3497	3788	4066	4332
4,4	0,95	4588	4832	5065	5288	5502	5706	5902	6089	6268	6439
4,5	0,95	6602	6759	6908	7051	7187	7318	7442	7561	7675	7784
4,6	0.95	7888	7987	8081	8172	8258	8340	8419	8494	8566	4534
4,7	0,95	8699	8761	8821	8877	8931	8983	9032	9079	9124	9166
4,8	0,96	2067	2454	2882	3173	3508	3827	4131	4420	4696	4958

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4,9	0,96	5208	5446	8673	5888	6094	6289	6475	6652	6821	6981
5,0	0,96	7131	7278	7416	7548	7672	7791	7904	8011	8113	3210
5,1	0,96	8302	8389	6472	8551	8626	8698	8765	8830	8891	8949
5,2	0,97	004	056	105	152	197	240	280	318	354	388
5,3	0,97	421	452	481	509	539	560	584	606	628	648
5,4	0,97	667	685	702	718	734	748	762	775	787	799
5,5	0,97	810	821	831	840	849	857	865	873	880	886
5,6	0,97	893	899	906	910	915	920	924	929	933	936
5,7	0,98	40	44	47	50	63	55	58	60	63	65
5,8	0,98	67	69	71	70	74	75	77	78	79	81
5,9	0,98	82	83	84	85	86	87	87	88	89	90
6,0	0,98	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 4

Значения гамма-функции Г(x)

x	Γ(x)	x	Γ(x)	x	Γ(x)	x	Γ(x)
1,00	1,0000	1.25	0,9064	1,50	0,8862	1,75	0,9191
1,01	0,9943	1,26	0,9044	1,51	0,8866	1,76	0,9214
1,02	0,9888	1,27	0,9025	1,52	0,8870	1,77	0,9238
1,03	0,9835	1,28	0,9007	1,53	0,8876	1,78	0,9262
1,04	0,9784	1, 29	0,8990	1,54	0,8882	1,79	0,9288
1,05	0.9735	1,30	0,8975	1,55	0,8889	1,80	0,9314
1,06	0,9687	1,31	0,8960	1,56	0,8896	1,81	0,9341
1 ,07	o,9642	1,32	0,8946	1,57	0,8905	1,82	0,9368
1,08	0,9597	1,33	0,8934	1,58	0,8914	1,83	0,9397

x	Γ(x)	x	Γ(x)	x	Γ(x)	x	Γ(x)
1,09	0,9555	1,34	0,8922	1,59	0,8924	1,84	0,9426
1,10	0,9514	1,35	0,8912	1,60	0,8935	1,85	0,9456
1,11	0,9474	1,36	0,8902	1,61	0,8947	1,86	0,9487
1,12	0,9436	1,37	0.8893	1,62	0,8959	1,87	0.9518
1,13	0,9399	1,38	0,8885	1 ,63	0,8972	1,88	0,9551
1,14	0,9364	1,39	0,8879	1,64	0,8986	1,89	0,9584
1.15	0,9330	1,40	0,8873	1,65	0,9001	1,90	0,9618
1,16	0,9298	1.41	0,8868	1,66	0.9017	1,91	0,9652
1,17	0,9267	1,42	0,8864	1,67	0,9033	1,92	0,9688
1,18	0,9237	1,43	0,8860	1,68	0,9050	1,93	0,9724
1,19	0,9209	1,44	0, 8858	1,89	0,9068	1,94	0,9761
1.20	0,9182	1,45	0,8857	I ,70	0,9086	1,95	0,9799
1,21	0 ,2450	1,46	0,8855	1,71	0,9106	1,96	0,9837
1,22	0,9131	1,47	0,8856	1,72	0,9120	1,97	0,9877
1,23	0.9108	1.48	0,8857	1,73	0,9147	1,98	0,9917
1,24	0,9085	1,49	0,8859	1,74	0,9168	1,99	0,9958
0,5	1,7725	2,5	1,3294	4,5	11,632	6,5	287,88
1	1	3	2	5	24	7	720
1,5	0,8802	3,5	3,3233	5,5	52,342	7,5	1871,2
2	1	4	6	6	120	8	5040

Таблица 5

Параметры и коэффициенты закона распределения Вейбула (ЗРВ)

b	K_b	C_b	V	S_b	$P_{оп}$
0,800	1,133	1,428	1,261	2,815	0,669
0,820	1,114	1,367	1,227	2,707	0,661
0,840	1,096	1,311	1,196	2,608	0,658
0,860	1,080	1,261	1,167	2,514	0,655
0,880	1,066	1,214	1,139	2,427	0,652
0,900	1,052	1,171	1,113	2,345	0,645
0,920	1,040	1,132	1,088	2,268	0,641
0,940	1,029	1,095	1,064	2,195	0,638
0,960	1,018	1,061	1,042	2,127	0,635
0,980	1,009	1,029	1,020	2,062	0,632
0,000	1,000	1,000	1,000	2,000	0,626
1,040	0,984	0,947	0,962	1,886	0,620
1,080	0,971	0,900	0,222	1,782	0,615
1,120	0,959	0,858	0,894	1,688	0,610
1,160	0,949	0,821	0,865	1,601	0,605
1,200	0,941	0,787	0,837	1,52	0,600
1,240	0,933	0,757	0,811	1,447	0,596
1,280	0,926	0,729	0,787	1,378	0,592
1,360	0,916	0,681	0,744	1,255	0,584
1,400	0,911	0,660	0,724	1,198	0,582
1,420	0,909	0,650	0,714	1, 172	0,580
1,440	0,908	0,640	0,705	1,146	0,578
1,460	0,906	0,631	0,696	1,120	0,577

b	K_b	C_b	V	S_b	$P_{оп}$
1,480	0,904	0,622	0,687	1,096	0,576
1,500	0,903	0,613	0,679	1,072	0,574
1,520	0,901	0,605	0,671	1,049	0,572
1,540	0,900	0,597	0,663	1,026	0,570
1,560	0,899	0,589	0,655	1.004	0,569
1,580	0,898	0,581	0,647	0,983	0,568
1,600	0,897	0,574	0,640	0,962	0,566
1,620	0,896	0,567	0,633	0,942	0,564
1,640	0,895	0,560	0,626	0,922	0,563
1,660	0,894	0,553	0,619	0,902	0,562
1,680	0,893	0,546	0,612	0,883	0,561
1,700	0,892	0,540	0,605	0,865	0,559
1,720	0,892	0,534	0,599	0,847	0,558
1,740	0,891	0,528	0,593	0,829	0,557
1,760	0,890	0,522	0,587	0,812	0,556
1,780	0,890	0,517	0,581	0,795	0,555
1,800	0,889	0,511	0,575	0,779	0,553
1,820	0,889	0,506	0,569	0,763	0,554
1,840	0,888	0,501	0,564	0,747	0,552
1,860	0,888	0,496	0,558	0,731	0,551
1,880	0,888	0,491	0,553	0,716	0,550
1,900	0,887	0,486	0,547	0,701	0,549
1,920	0,887	0,481	0,542	0,687	0,548
1,940	0,887	0,476	0,537	0,672	0,547
1,960	0,887	0,472	0,532	0,658	0,546
1,980	0,886	0,468	0,527	0,645	0,545

b	K_b	C_b	V	S_b	$P_{оп}$
2,000	0,886	0,463	0,523	0,631	0,544
2,020	0,886	0,459	0,518	0,618	0,543
2,040	0,886	0,455	0,513	0,605	0,542
2,060	0,886	0,451	0,509	0,592	0,541
2,080	0,886	0,447	0,505	0,579	0,540
2,100	0,886	0,443	0,500	0,567	0,539
2,120	0,886	0,439	0,496	0,555	0,538
2,140	0,886	0,436	0,492	0,543	0,537
2,160	0,886	0,432	0,488	0,531	0,536
2,180	0,886	0,428	0,484	0,520	0,535
2,200	0,886	0,425	0,480	0,509	0,535
2,220	0,886	0,421	0,476	0,498	0,534
2,240	0,886	0,418	0,472	0,487	0,533
2,260	0,886	0,415	0,468	0,476	0,533
2,280	0,886	0,412	0,465	0,465	0,532
2,300	0,886	0,408	0,461	0,455	0,531
2,320	0,886	0,405	0,457	0,444	0,531
2,340	0,886	0,402	0,454	0,434	0,530
2,360	0,886	0,399	0,451	0,424	0,529
2,380	0,886	0,396	0,447	0,415	0,528
2,400	0,886	0,393	0,444	0,405	0,527
2,420	0,887	0,391	0,441	0,395	0,527
2,440	0,887	0,388	0,437	0,386	0,526
2,460	0,887	0,385	0,434	0,377	0,526
2,480	0,887	0,382	0,431	0,368	0,525
2,500	0,887	0,380	0,428	0,359	0,524

b	K_b	C_b	V	S_b	$P_{оп}$
2,520	0,887	0,377	0,425	0,350	0,524
2,540	0,888	0,374	0,422	0,341	0,523
2,560	0,888	0,372	0,419	0,332	0,522
2,580	0,888	0,369	0,416	0,324	0,521
2,600	0,888	0,367	0,413	0,315	0,520
2,620	0,888	0,364	0,410	0,307	0,520
2,640	0,889	0,362	0,407	0,299	0,519
2,680	0,889	0,357	0,402	0,283	0,518
2,700	0,889	0,355	0,399	0,275	0,517
2,720	0,889	0,353	0,397	0,267	0,517
2,740	0,890	0,351	0,394	0,260	0,516
2,760	0,890	0,348	0,392	0,252	0,516
2,780	0,890	0,346	0,389	0,245	0,515
2,800	0,890	0,344	0,387	0,237	0,514
2,820	0,891	0,342	0,384	0,230	0,514
2,840	0,891	0,340	0,382	0,223	0,513
2,860	0,891	0,338	0,379	0,216	0,513
2,880	0,891	0,336	0,377	0,209	0,512
2,900	0,892	0,334	0,375	0,202	0,512
2,920	0,892	0,332	0,372	0,195	0,511
2,940	0,892	0,330	0,370	0,188	0,512
2,960	0,892	0,328	0,368	0,181	0,510
2,980	0,893	0,326	0,366	0,175	0,510
3,000	0,893	0,325	0,363	0,168	0,509
3,020	0,893	0,323	0,361	0,162	0,509
3,040	0,893	0,321	0,359	0,155	0,508

b	K_b	C_b	V	S_b	$P_{оп}$
3,060	0,894	0,319	0,357	0,149	0,508
3,080	0,894	0,317	0,355	0,143	0,507
3,100	0,894	0,316	0,353	0,136	0,507
3,120	0,895	0,314	0,351	0,130	0,507
3,140	0,895	0,312	0,349	0,124	0,506
3,160	0,895	0,310	0,347	0,118	0,506
3,180	0,895	0,309	0,345	0,112	0,505
3,200	0,896	0,307	0,343	0,106	0,505
3,220	0,896	0,306	0,341	0,101	0,505
3,240	0,896	0,304	0,339	0,095	0,504
3,260	0,896	0,302	0,337	0,089	0,504
3,280	0,897	0,301	0,335	0,083	0,503
3,300	0,897	0,299	0,334	0,078	0,503
3,320	0,897	0,298	0,332	0,072	0,503
3,340	0,898	0,296	0,330	0,067	0,502
3,360	0,898	0,295	0,328	0,061	0,502
3,380	0,898	0,293	0,326	0,056	0,501
3,400	0,898	0,292	0,325	0,051	0,501
3,420	0,899	0,290	0,323	0,046	0,501
3,440	0,899	0,289	0,321	0,040	0,500
3,460	0,800	0,287	0,320	0,035	0,500
3,480	0.800	0,286	0,318	0,030	0,499
3,500	0,000	0,285	0,316	0,025	0,499
3,520	0,900	0,283	0,315	0,020	0,499
3,540	0,900	0,282	0 313	0,015	0,498
3,560	0,901	0,281	0,312	0,010	0,498

b	K_b	C_b	V	S_b	$P_{оп}$
3,580	0,901	0,279	0,310	0,005	0,497
3,600	0,901	0,278	0,308	0,001	0,497
3,620	0,901	0,277	0,307	-0,004	0,497
3,640	0.902	0,275	0,305	-0,009	0,496
3,660	0,902	0,274	0,304	-0,014	0,496
3,680	0,902	0,273	0,302	-0,018	0,495
3,700	0,902	0,272	0,301	-0,023	0,495
3,720	0,903	0,270	0,299	-0,027	0,495
3,740	0,903	0,269	0,298	-0,032	0,496
3,760	0,903	0,268	0,297	-0,036	0,494
3,780	0,903	0,267	0,295	-0,041	0,494
3,800	0,904	0,266	0,294	-0,045	0,494
3,820	0,904	0,264	0,292	-0,050	0,494
3,840	0,904	0,263	0,291	-0,054	0,494
3,860	0,905	0,262	0,290	-0,058	0,493
3,880	0,905	0,261	0,288	-0,062	0,493
3,900	0,905	0,260	0,287	-0,067	0,492
3,920	0,905	0,259	0,286	-0,071	0,492
3,940	0,906	0,258	0,284	-0,075	0,491
3,960	0,906	0,256	0,283	-0,079	0,491
3,980	0,906	0,255	0,282	-0,083	0,491
4,000	0,906	0,254	0,280	-0,087	0,491
4,020	0,907	0,253	0,279	-0,091	0,490
4,040	0,907	0,252	0,278	-0,095	0,490
4,060	0,907	0,251	0,277	-0,990	0,489
4,080	0,907	0,250	0,276	-0,103	0,489

b	K_b	C_b	V	S_b	$P_{оп}$
4,100	0,908	0,246	0,274	-0,107	0,489
4,120	0,908	0,248	0,273	-0,111	0,488
4,140	0,908	0,247	0,272	-0,115	0,488
4,160	0,908	0,246	0,271	-0,118	0,488
4,180	0,909	0,245	0,270	-0,122	0,487
4,200	0,909	0,244	0,268	0,126	0,487

Таблица 6

Дифференциальная функция (функция плотности вероятности) закона распределения Вейбулла (ЗРВ)

$\frac{t_{i_c} - t_{см}}{a}$	Параметр b					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0
0,1	0,91	0,71	0,54	0,39	0,28	0,20	0,03
0,2	0,82	0,75	0,66	0,57	0,47	0,38	0,12
0,3	0,74	0,75	0,72	0,67	0,61	0,55	0,26
0,4	0,67	0,72	0,74	0,73	0,71	0,68	0,45
0,5	0,61	0,68	0,73	0,76	0,78	0,78	0,66
0,6	0,55	0,63	0,70	0,76	0,80	0,84	0,87
0,7	0,50	0,58	0,66	0,73	0,80	0,86	1,04
0,8	0,45	0,53	0,62	0,70	0,77	0,84	1,15
0,9	0,41	0,49	0,57	0,65	0,72	0,80	1,17
1,0	0,37	0,44	0,52	0,59	0,66	0,74	1,10
1,1	0,33	0,40	0,46	0,53	0,59	0,66	0,96
1,2	0,30	0,36	0,41	0,47	0,52	0,57	0,77
1,3	0,27	0,32	0,37	0,41	0,45	0,48	0,56
1,4	0,25	0,29	0,32	0,35	0,38	0,39	0,38

1,5	0,22	0,26	0,28	0,30	0,31	0,32	0,23
1,6	0,20	0,23	0,25	0,25	0,26	0,25	0,13
1,7	0,18	0,20	0,21	0,21	0,21	0,19	0,06
1,8	0,17	0,18	0,18	0,18	0,16	0,14	0,03
1,9	0,15	0,16	0,16	0,14	0,13	0,10	0,01
2,0	0,14	0,14	0,13	0,12	0,10	0,07	0,00
2,1	0,12	0,12	0,11	0,09	0,07	0,05	0,00
2,2	0,11	0,11	0,09	0,08	0,05	0,04	-
2,3	0,10	0,09	0,08	0,06	0,04	0,02	-
2,4	0,09	0,08	0,07	0,05	0,03	0,02	-
2,5	0,08	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01	-

Таблица 7

Интегральная функция (функция распределения) $F(t_{ik} - t_{см})$ законе распределения Вейбулла (ЗРВ)

$\frac{t_{i_k} - t_{см}}{a}$	Параметр b														
	0,9	1,0	1.1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
0,1	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
0,2	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
0,3	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
0,4	0,35	0,33	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10
0,5	0,41	0,39	0,37	0,35	0,33	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,20	0,18	0,17
0,6	0,47	0,45	0,43	0,42	0,40	0,39	0,37	0,36	0,34	0,33	0,32	0,30	0,29	0,28	0,27	0,25
0,7	0,52	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,44	0,43	0,43	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35
0,8	0,56	0,55	0,54	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,45	0,44
0,9	0,60	0,59	0,59	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54

$\frac{t_{i_k} - t_{см}}{a}$	Параметр b															
	0,9	1,0	1.1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,1	о,66	0,67	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,71	0,71	0,72
1,2	0,69	0,70	0,71	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,74	0,75	10,76	0,76	0,77	0,78	0,78	0,79
1,3	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,82	0,83	0,84	0,85
1,4	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,88
1,5	0,76	0,78	0,79	0,80	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,89	0,90	0,90	0,91	0,92	0,93
1.6	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0.95
1,7	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97
1.8	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,97	0,97	0,97	0,98	038
1,9	0,83	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,09
2,0	0,85	0,87	0,88	0,90	0,92	0,93	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98
2,1	0,86	0,88	0,90	0,91	0,93	0,94	0,93	0,96	0,97	0,98	0,93	0,99	0,99	0,099	1,00	*0,99*
2,2	0,87	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99,	1,00	1,00	1,00
2,3	0,88	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,4	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,5	0,90	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,6	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00
2,7	0,91	0,93	0,95	0,96	0,9/	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,8	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0
2,9	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1.00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3,0	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

$t_{i_k} - t_{см}$	Параметр b															
a	0,9	1,0	1.1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
3,5	0,95	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4,0	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1.00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Продолжение таблицы 7

$t_{i_k} - t_{см}$	Параметры b															
a	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	32	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	;0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,3	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
0,4	0,10	0,09	0,03	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
0,5	0.16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06
0,6	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12
0,7	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21
0,8	0,44	0,43	0,42	0,41	0,41	0,40	0,39	0,33	0,38	0,37	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34	0,34
0,9	0,54	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	o,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,83
1,1	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77
1,2	0,72	0,80	0,81	0,81	0,82	0,82	0,83	0,84	0,84	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87
1,3	0,80	0,80	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90	0,90	0,91	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,84
1,4	0.90	0,91	0,02	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
1,5	0,94	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98

1,6	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,7	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,8	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,9	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблица 8

Квантили закона нормального распределения (ЗНР) $H_к$

F(t):$\sum P_i$	Сотые доли									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	0,000	0,025	0,050	0,075	0,100	0,126	0,151	0,176	0,202	0,227
0,6	0,253	0,279	0,305	0,332	0,358	0,385	0,412	0,440	0,468	0,496
0,7	0,524	0,553	0,583	0,613	0,643	0,675	0,706	0,739	0,772	0,806
0,8	0,842	0,878	0,915	0,954	0,994	1,036	1,080	1,126	1,175	1,227
0,9	1,282	1,341	1,405	1,476	1,555	1,645	1,751	1,881	2,054	2,326

Таблица 9

Квантили закона распределения Вейбулла (ЗРВ) $H_к^в$

F(t):$\sum P_i$	Параметр b														
	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	,0,08	0,09	0,10	0,16	0,22	0,27	0,32
0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18	0,25	0,31	0,37	0,42
0,05	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19	0,21	0,23	0,31	0,3	0,43	0,48

$F(t){:}\sum P_i$	Параметр b															
	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
0,07	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,35	0,42	0,47	0,52
0,10	0,08	0,11	0,13	0,15	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,41	0,47	0,53	0,57
0,15	0,14	0,17	0,19	0,23	0,25	0,29	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,42	0,50	0,56	0,60	0,63
0,20	0,19	0,22	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,44	0,45	0,47	0,55	0,61	0,65	0,69
0,25	0,25	0,29	0,33	0,36	0,39	0,41	6,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,61	0,66	0,70	0,73
0,30	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,50	0,53	0,55	0,56	0,58	0,60	0,66	0,71	0,75	0,77
0,35	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62	0,64	0,66	0,71	0,75	0,79	0,81
0,40	0,47	0,51	0,54	0,57	0,60	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70	0,72	0,76	0,80	0,83	0,85
0,45	0,57	0,60	0,63	0,66	0,68	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,81	0,84	0,86	0,88
0,50	0,67	0,69	0,72	0,74	0,75	0,77	0,78	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,86	0,89	0,90	0,91
0,55	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,91	0,93	0,94	0,95
0,60	0,91	0,92	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98
0,65	1,07	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02
0,70	1,23	1,20	1,18	1,17	1,15	1,14	1,13	1,02	1,12	1,11	1,10	1,10	1,08	1,06	1,05	1,05
0,75	1,45	1,40	1,36	1,33	1,30	1,27	1,25	1,23	1,22	1,21	1,20	1,18	1,14	1,11	1,10	1,09
0,80	1,70	1,61	1,54	1,49	1,44	1,41	1,37	1,35	1,32	1,30	1,29	1,27	1,21	1,17	1,15	1,13
0,85	2,11	1,96	1,84	1,74	1,67	1,61	1,55	1,51	1,47	1,45	1,32	1,39	1,31	1,25	1,21	1,18
0,90	2,53	2,30	2,13	2,00	1,90	1,81	1,74	1,68	1,63	1,59	1,55	1,52	1,40	1,32.	1,27	1,23
0,93	2,96	2,66	2,43	2,26	2,12	2,01	1,92	1,84	1,78	1,72	1,67	1,63	1,48	1,39	1,32	1,28
0,95	3,38	3,00	2,71	2,49	2,33	2,19	2,08	1,99	1,91	1,84	1,78	1,73	1,55	1,44	1,37	1,32
0,97	4,03	3,51	3,13	2,84	2,63	2,45	2,31	2,19	2,09	2,01	1,94	1,87	1,65	1,52	1,43	1,37

$F(t):\sum P_i$	Параметр b															
	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
0,99	5,46	4,60	4,01	3,57	3,24	2,98	2,77	2,60	2,46	2,34	2,23	2,15	1,84	1,66	1,55	1,46

Таблица 10

Вероятность совпадения P % по критерию согласия

r	P,%							
	95	90	80	70	50	30	20	10
1	0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3	0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24
6	1,64	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,6
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,34	8,38	9,80	12,0
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	31,0	13,4
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,7	12,2	14,7
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,8	13,4	16,0

Таблица 11

Коэффициенты t_a,r_1 и r_3 для двухсторонних доверительных границ

N	α=0,60			α=0,80			α=0,90			α=0,95		
	t_a	r_1	r_3	t_a	r_1	r_3	t_a	r_1	r_3	t_a	r_1	r_3
3	1,06	1,95	0,70	1,89	2,73	0,57	2,92	3,66	0,48	4,30	4,85	0,42

N	α=0,60			α=0,80			α=0,90			α=0,95		
	t_a	r_1	r_3	t_a	r_1	r_3	t_a	r_1	r_3	t_a	r_1	r_3
4	0,98	1,74	0,73	1,64	2,29	0,60	2,35	2,93	0,52	3,18	3,67	0,46
5	0,94	1,62	0,75	1,53	2,05	0,62	2,13	2,54	0,55	2,78	3,07	0,49
6	0,92	1,54	0,76	1,48	1,90	0,65	2,02	2,29	0,57	2,57	2,72	0,51
7	0,91	1,48	0,77	1,44	1,80	0,67	1,94	2,13	0,59	2,45	2,48	0,54
8	0,90	1,43	0,78	1,42	1,72	0,68	1,90	2,01	0,61	2,37	2,32	0,56
9	0,89	1,40	0,79	1,40	1,66	0,69	1,86	1,91	0,63	2,31	2,18	0,57
10	0,88	1,37	0,80	1,38	1,61	0,70	1,83	1,83	0,64	2,26	2,09	0,59
11	0,88	1,35	0,80	1,37	1,57	0,70	1,81	1,78	0,64	2,23	2,00	0,60
12	0,88	1,33	0,81	1,36	1,53	0,71	1,80	1,73	0,65	2,20	1,94	0,61
13	0,87	1,31	0,81	1,36	1,50	0,73	1,78	1,69	0,66	2,18	1,88	0,62
14	0,87	1,29	0,83	1,35	1,48	0,74	1,77	1,65	0,67	2,16	1,83	0,63
15	0,87	1,28	0,83	1,35	1,46	0,74	1,76	1,62	0,68	2,15	1,79	0,64
20	0,86	1,24	0,85	1,33	1,37	0,77	1,73	1,51	0,72	2,09	1,64	0,67
25	0,86	1,21	0,86	1,32	1,33	0,79	1,71	1,44	0,74	2,06	1,55	0,70
30	0,85	1,18	0,87	1,31	1,29	0,80	1,70	1,39	0,76	2,04	1,48	0,72
40	0,85	1,16	0,88	1,30	1,24	0,83	1,68	1,32	0,78	2,02	1,40	0,75
50	0,85	1,14	0,89	1,30	1,21	0,84	1,68	1,28	0,80	2,01	1,35	0,77
60	0,85	1,12	0,90	1,30	1,19	0,86	1,67	1,25	0,82	2,00	1,31	0,79
80	0,85	1,10	0,91	1,29	1,16	0,87	1,66	1,21	0,84	1,99	1,27	0,81
100	0,85	1,09	0,92	1,29	1,14	0,88	1,66	1,19	0,86	1,98	1,23	0,83

Таблица 12

Количество машин или их элементов (повторность информации) N при односторонней доверительной вероятности α_0

N	ЗНР σ/V			ЗРВ $(\sigma+1)^{в}$		
	α_0=0,80	α_0=0,90	α_0=0,95	α_0=0,80	α_0=0,90	α_0=0,95
4	0,49	0,82	1,17	1,74	2,29	2,93
6	0,38	0,60	0,82	1,54	1,90	2,29
8	0,32	0,50	0,67	1,43	1,72	2,01
10	0,28	0,44	0,58	1,37	1,61	1,82
12	0,25	0,39	0,52	1,33	1,53	1,73
14	0,23	0,36	0,47	1,29	1,48	1,65
16	0,22	0,33	0,44	1,27	1,43	1,59
18	0,20	0,31	0,41	1,25	1,40	1,55
20	0,19	0,30	0,39	1,23	1,37	1,51
22	0,18	0,28	0,37	1,22	1,35	1,48
24	0,17	0,27	0,35	1,21	1,33	1,45
26	0,17	0,26	0,33	1,20	1,32	1,43
28	0,16	0,25	0,32	1,19	1,30	1,41
30	0,16	0,24	0,31	1,18	1,29	1,39
40	0,13	0,20	0,26	1,16	1,24	1,32
50	0,12	0,18	0,24	1,14	1,21	1,28

N	ЗНР σ/V			ЗРВ $(\sigma+1)^{в}$		
	α_0=0,80	α_0=0,90	α_0=0,95	α_0=0,80	α_0=0,90	α_0=0,95
60	0,11	0,16	0,22	1,12	1,19	1,25
70	0,10	0,15	0,20	1,11	1,17	1,23
80	0,10	0,14	0,19	1,10	1,16	1,21
90	0,10	0,14	0,18	1,10	1,15	1,20
100	0,09	0,13	0,17	1,09	1,14	1,19