

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

**ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ
МАШИН**

Методические указания к практическим занятиям

Составитель
Ю.В. Баженов Ю.В.

Владимир 2015

УДК 629.113.004.58 (07)

ББК 39.3

Рецензент

Доктор технических наук, профессор
Зав. кафедрой «Мехатроника и электронные системы автомобиля»
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
А.А. Кобзев

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Эксплуатационная надежность колесных транспортных машин: Метод. указания к практ. занятиям / Владим. гос. ун-т имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; сост. Ю.В. Баженов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2015. – 70 с.

Представлены практические работы, каждая из которых содержит общие сведения, порядок выполнения работы, варианты заданий, содержание отчета по работе, контрольные вопросы.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» всех форм обучения.

Ил. 18 . Табл. 14 . Библиогр.: 16 назв.

УДК 629.113.004.58 (07)

ББК 39.3

ВВЕДЕНИЕ

К современным транспортным машинам предъявляют высокие требования по надежности и работоспособности при выполнении ими заданных функций. При этом с усложнением техники, внедрением в ее структуру электроники, компьютерных технологий, эти требования постоянно возрастают. В полной мере это относится и к таким сложным техническим системам, как транспортная техника. Усложнение транспортных машин и усиление требований к ним привели к тому, что проблема повышения их эксплуатационной надежности приобрела огромное значение. Транспортная техника, не отвечающая высоким требованиям по надежности, уровню потребительских свойств, не имеет перспектив в условиях острой конкуренции аналогичной продукции.

Проблема обеспечения высокого уровня потребительских свойств транспортной техники, ее долговечности, безотказности и ремонтпригодности непрерывно обостряется, поэтому именно надежность определяет перспективы развития отечественного машиностроения в условиях острой конкуренции как внутри страны, так и со стороны зарубежных производителей транспортной техники.

Изучение дисциплины «Эксплуатационная надежность колесных транспортных машин» является важным элементом в исследованиях, посвященных повышению качества и надежности отечественной транспортной техники. Поэтому эта дисциплина является одной из базовых дисциплин при обучении магистров по направлению подготовки - 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Работа № 1

ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Цель работы – изучить:

- термины и определения в теории надежности;
- показатели для оценки надежности.

Общие сведения

Важнейшим свойством любой машины, позволяющим количественно оценить изменение показателей качества во времени, является надёжность. Под *надёжностью автомобиля*, например, принято понимать его свойство выполнять транспортную работу, сохраняя во времени или по пробегу эксплуатационные показатели в требуемых пределах.

Надёжность является сложным (комплексным) свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения характеризуется сочетанием более простых свойств: *безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью*. Важнейшими из них являются долговечность и безотказность.

ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Для оценки долговечности машин используются следующие основные показатели:

- средний ресурс;
- средний срок службы;
- гамма-процентный ресурс.

Под **ресурсом** понимается суммарная наработка изделия от начала эксплуатации (или ее возобновления после капитального ремонта) до предельного состояния, оговоренного технической документацией.

По результатам статистической обработки данных, получаемых при испытаниях или эксплуатации, средний ресурс определяется по формуле

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad (1)$$

где N – число изделий, находящихся под наблюдением; T_i – наработка i -го изделия до КР или списания.

Срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации изделия от ее начала (или возобновление после КР) до наступления предельного состояния.

Гамма-процентный ресурс – это наработка, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Гамма-процентный ресурс легко определяется, если известны кривая вероятности безотказной работы $P(t)$ или плотность распределения наработок до отказа $f(t)$ (рис. 1).

Для этого через точку $P(t) = \gamma$ (рис 1, а) на оси ординат следует провести горизонталь до пересечения с кривой вероятности безотказной работы. Абсцисса точки пересечения и будет γ - процентным ресурсом. Например, для $\gamma = 90\%$ соответствует наработка $t_\gamma = 90\%$, которая и является γ - процентным ресурсом для данного изделия.

Для партии изделий γ - процентный ресурс представляет собой наработку, которую имеют или превышают обусловленный процент изделий γ (рис. 1, б). Вертикальная линия с абсциссой, равной γ - процентному ресурсу, пересекает площадь под кривой $f(t)$ на две области: справа находится область, площадь которой равна вероятности работы без нарушения работоспособного состояния, а слева - область, площадь которой равна вероятности работы с возможными отказами.

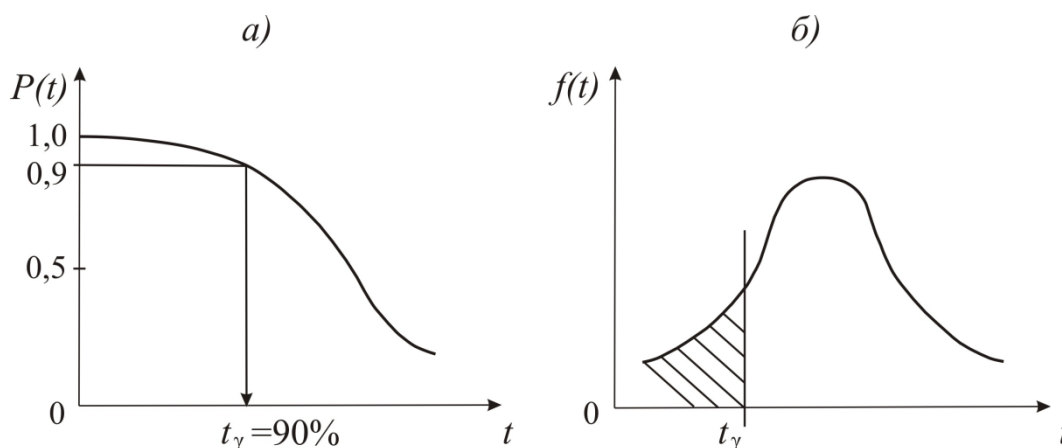


Рис. 1. Схема определения γ – процентного ресурса

При известной функции распределения ресурса γ - процентный ресурс находится из выражения

$$1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t) dt = \frac{\gamma}{100} \quad (2)$$

ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Для количественной оценки безотказности используют следующие показатели:

- вероятность безотказной работы;
- среднюю наработку на отказ;
- среднюю наработку до отказа;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов.

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникнет. Этот показатель применяется как для *восстанавливаемых*, так и для *невосстанавливаемых* изделий.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы $P(t)$ по результатам испытаний определяется отношением числа исправных изделий к общему числу находящихся под наблюдением изделий на протяжении наработки t :

$$\bar{P}(t) = \frac{N - \sum_{j=1}^k m_j}{N}, \quad (3)$$

где N – число работоспособных изделий на начало наблюдений; m_j – число изделий, отказавших в j -м интервале наработки; $k = t/\Delta t$ – число интервалов наработки.

Средняя наработка на отказ – это среднее значение наработки *восстанавливаемого* изделия между отказами. Статистическая оценка этого показателя определяется отношением суммарной наработки изделия к числу отказов в течение этой наработки

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{T}{n}, \quad (4)$$

где t_1, t_2, \dots, t_n – наработки изделия между отказами; T – суммарная наработка изделия за время испытаний; n – число отказов на этой наработке.

Если наработка от начала эксплуатации до t разбита на r интервалов Δt и число отказов внутри каждого интервала равно m_j , то

$$\bar{t} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_r t_r}{m_1 + m_2 + \dots + m_r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r m_j t_j, \quad (5)$$

где $n = m_1 + m_2 + \dots + m_r$; t_1, t_2, \dots, t_r – средняя наработка изделия в каждом интервале.

Средняя наработка до отказа – это среднее значение наработки *невосстанавливаемого* объекта до первого отказа. Статистическая оценка этого показателя определяется отношением суммы наработок испытуемых изделий до первого отказа к их количеству

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j, \quad (6)$$

где t_1, t_2, \dots, t_N – наработки изделий до первого отказа.

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

Статистическая оценка этого показателя по результатам экспериментальных исследований находится по формуле:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (7)$$

где $N(t), N(t + \Delta t)$ – количество работоспособных изделий при наработках t и $t + \Delta t$; Δt – интервал наработки.

Из этого выражения следует, что интенсивность отказов $\lambda(t)$ представляет собой количество отказов, приходящихся на одно работоспособное изделие $N(t)$ за единицу наработки Δt .

Параметр потока отказов представляет собой отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки

Статистическую оценку для параметра потока отказов $\bar{\omega}(t)$ определяют по формуле

$$\bar{\omega} = \frac{m(t_2) - m(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (8)$$

По сравнению с формулой (7) здесь рассматривается число отказов за конечный отрезок времени (t_1, t_2) , при $t_1 \leq t \leq t_2$.

Выполнение работы

После изучения указаний студент получает *персональные статистические данные* по эксплуатационной надежности агрегатов, узлов и систем автомобиля и выполняет расчеты показателей долговечности и безотказности.

По завершении занятий оформляется отчет о выполненной работе и осуществляется его защита.

Продолжительность работы 4 часа.

Задание 1. По выданному преподавателем вариационному ряду рассчитать показатели долговечности.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за долговечностью двигателей установлены значения их ресурсов в тыс. км (табл.1)

Таблица 1. Значения ресурсов двигателей

156	194	202	182	226	197	174	191	204	186	198	212
222	184	196	245	203	209	214	219	188	176	203	208
231	174	213	200	192	209	231	234	192	196	223	234
179	203	234	187	217	228	218	181	198	192		

По данным табл. 1 находим:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 245 - 156 = 89$ тыс.км.
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg N = 1 + 3,32 \lg 46 \approx 9$.
- ширину интервала $h = R/k = 89/9 \approx 10$ тыс.км.

Определяем границы интервалов, их средние значения и частоты попаданий опытных данных в интервалы наработок двигателя до предельного состояния. Полученные результаты сведем в табл. 2.

Таблица 2. Параметры интервалов

Параметр	Интервал наработки								
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й
Границы интервалов, тыс. км	155-165	165-175	175-185	185-195	195-205	205-215	215-225	225-235	235-245
Середины интервалов \bar{t}_i , тыс. км	160	170	180	190	200	210	220	230	240
Опытные частоты \bar{m}_i	1	2	5	8	11	9	6	3	1

Определяем показатели долговечности:

- средний ресурс $t_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i m_i = 201,304$ тыс. км;
- среднеквадратическое отклонение

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})^2 m_i}{n-1}} = 34,421 \text{ тыс. км};$$

- коэффициент вариации $\nu = \frac{\sigma(t)}{t_{\text{cp}}} = 0,17$

Строим гистограмму распределения ресурса, аппроксимирующую ее плотность вероятности (рис. 2) и интегральную функцию распределения ресурса по наработке (рис. 3).

Для определения гамма-процентного ресурса задают значение $\gamma = 0,8$ (80 %) или $\gamma = 0,9$ (90 %) и с использованием графика распределения ресурса находят его значение. Например, гамма-процентному ресурсу $\gamma = 0.8$ (80 %) соответствует ресурс $t_{\gamma} \approx 183$ тыс. км.

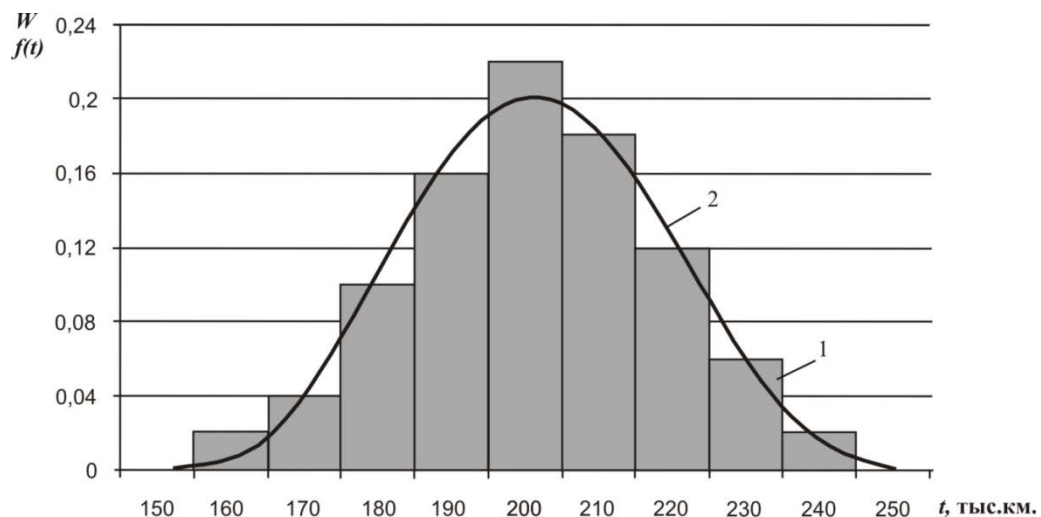


Рис. 2. Гистограмма 1 и дифференциальная функция распределения 2 ресурса двигателей

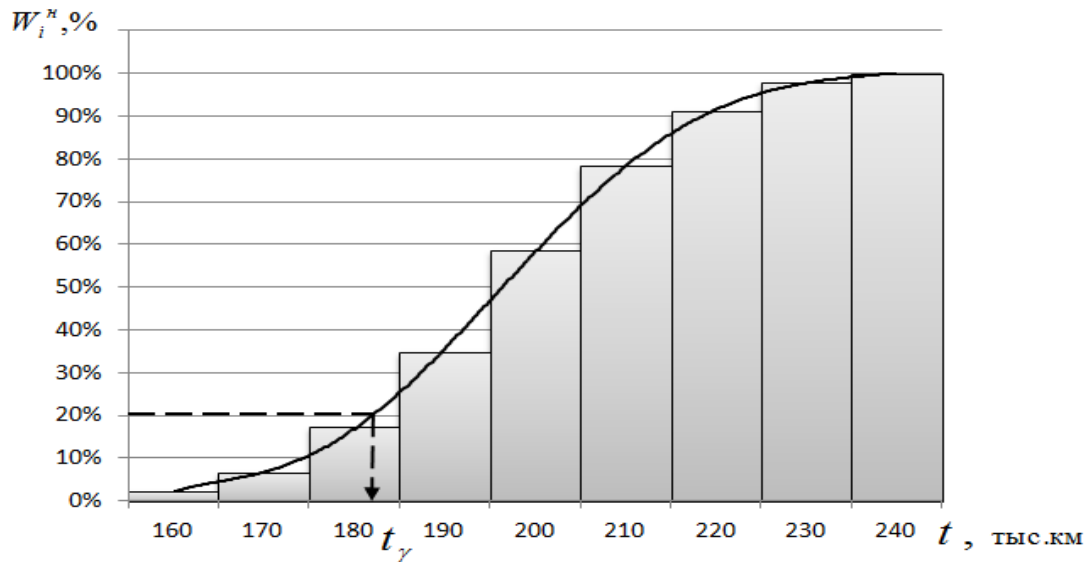


Рис. 3. Интегральная функция распределения ресурса двигателей по наработке

Задание 2. По выданному преподавателем вариационному ряду наработок до отказа рассчитать показатели безотказности

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за долговечностью свечей зажигания установлены их наработки до отказа в тыс. км (табл.3)

Таблица 3. Значения наработок свечей зажигания до отказа, тыс. км

21,8	24,6	29,2	30,2	31,0	25,7	27,1	35,1	27,4	28,8	27,3	31,2
26,8	22,0	26,2	34,2	30,9	18,1	23,4	28,2	23,1	37,9	30,7	23,9
22,1	34,7	25,5	26,9	29,9	25,7	38,9	24,8	28,6	27,2	25,9	28,8

По данным табл. 3 находим:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 38,9 - 18,1 = 20,8$ тыс.км.
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg N = 1 + 3,32 \lg 36 \approx 7$.
- ширину интервала $h = R/k = 20,8/7 = 3,0$ тыс.км.

Определяем границы интервалов, их средние значения и частоты попаданий опытных данных в интервалы наработок. Полученные результаты сведем в табл. 4.

Таблица 4. Параметры интервалов наработок свечей зажигания

Параметр	Интервал наработки						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
Границы интервалов,	18-21	21-24	24-27	27-30	30-33	33-36	36-39

тыс. км							
Средины интервалов \bar{t}_i , тыс. км	19,5	22,5	25,5	28,5	31,5	34,5	37,5
Опытные частоты \bar{m}_i	1	6	9	10	5	3	2

Определяем показатели безотказности свечей зажигания

- средняя наработка до отказа:

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i \bar{m}_i = 27,9 \text{ тыс.км}$$

- статистические оценки вероятности безотказной работы по интервалам наработки Δt :

$$\bar{P}(t_1) = \frac{36-1}{36} = 0,97 \quad \bar{P}(t_2) = \frac{36-(1+6)}{36} = 0,81 \quad \bar{P}(t_3) = \frac{36-(1+6+9)}{36} = 0,56$$

- интенсивность отказов на интервалах наработки:

$$\bar{\lambda}(t_1) = \frac{36-35}{36 \times 3000} = 0,0011 \quad \bar{\lambda}(t_2) = \frac{36-35}{36 \times 3000} = 0,0011 \quad \bar{\lambda}(t_3) = \frac{29-9}{29 \times 3000} = 0,0022$$

Для остальных интервалов оценки статистических вероятностей безотказной работы и интенсивности отказов приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчетов $P(t_i)$ и $\lambda(t_i)$ по интервалам наработки

Функция	Интервал наработки						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
$P(t_i)$	0,97	0,81	0,56	0,28	0,14	0,06	0,00
$F(t_i)$	0,03	0,19	0,44	0,72	0,86	0,94	1,00
$\lambda(t_i) \times 10^{-3}$	0,001	0,065	0,15	0,24	0,28	0,31	0,33

По результатам выполненных расчетов строится гистограмма распределения опытных частот \bar{m}_i , а также графики функций распределения $P(t_i)$, $F(t_i)$ и $\lambda(t_i)$ по интервалам наработки.

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;

- основные показатели для оценки надежности машин;
- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов показателей безотказности;
- гистограмму, дифференциальную и интегральную функции распределения ресурса;
- гистограммы распределения наработок на отказ, графики распределения вероятностей безотказной работы $P(t_i)$, отказов $F(t_i)$ и интенсивности отказов $\lambda(t_i)$;
- заключение и выводы по надежности исследуемого изделия.

Контрольные вопросы

1. Раскройте сущность понятий качества, надежности и работоспособности машин.
2. Какими свойствами характеризуется надежность изделий?
3. Что понимается под долговечностью машин? Какими показателями оценивается это свойство надежности?
4. Что понимается под безотказностью машин и какими показателями оценивается это свойство надежности?

Работа № 2.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Цель работы – изучить:

- порядок обработки экспериментальных данных;
- построение гистограмм и теоретических кривых распределения наработок до отказа.

Общие сведения

Для оценки случайной однородной величины используются два вида характеристик: полные и числовые. Основными числовыми характеристиками случайной величины являются: среднее арифметическое (выборочное среднее), среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Среднее арифметическое случайной величины характеризует центр группирования всей совокупности ее значений:

$$\bar{X} = (X_1 m_1 + X_2 m_2 + \dots + X_k m_k) / n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i m_i, \quad (1)$$

где X_i – центр i -го интервала вариационного ряда; m_i – соответствующая данному интервалу частота; k – количество интервалов вариационного ряда; n – объем выборки обследования.

Среднее квадратическое отклонение случайной величины $\sigma(x)$, характеризующее меру рассеивания значений X вокруг центра группирования \bar{X} , определяется по формуле

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 m_i}{n - 1}}. \quad (2)$$

Коэффициент вариации ряда v оценивает относительную меру рассеивания случайной величины X и в первом приближении позволяет судить о законе ее распределения

$$v = \frac{\sigma(x)}{\bar{X}}. \quad (3)$$

Чем меньше значение коэффициента вариации, тем плотнее группируются результаты испытаний вокруг среднего значения \bar{X} , тем, следовательно, меньше их рассеивание.

Полные характеристики – это так называемые *законы распределения*, представляющие собой математические зависимости, по которым можно

определить показатели надежности исследуемых технических систем. В общем случае в качестве таких обобщенных зависимостей используются интегральные $F(x)$, $P(x)$ и дифференциальные $f(t)$ функции распределения случайной величины. Для автотранспортной техники в качестве случайной величины чаще всего используют значение наработки t (до 1-го отказа, между отказами, до предельного состояния и т.д.). Поэтому при обработке информации о надежности по результатам испытаний вместо абстрактной случайной величины X используется наработка t .

Графическая интерпретация интегральной $F(t)$ и дифференциальной $f(t)$ функций распределения случайной величины наработки представлена на рис. 1.

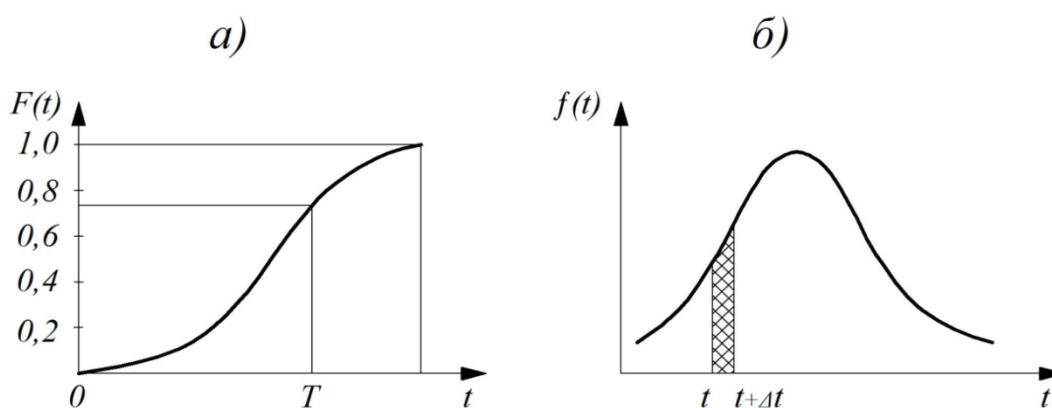


Рис.1. Графическая интерпретация интегральной (а) и дифференциальной (б) функций распределения случайной величины

При обработке информации о надежности автомобилей наиболее широкое распространение получили следующие законы распределения: *экспоненциальный, нормальный, логарифмически нормальный, Вейбулла.*

Порядок обработки экспериментальных данных

В первичной документации, где фиксируются результаты испытаний на надежность, содержатся данные, в которых трудно усмотреть какой-либо порядок и закономерности. Обработку этих данных начинают с составления таблицы, в которой их располагают в порядке увеличения полученных при испытаниях значений. Дальнейшую обработку статистической информации проводят в следующей последовательности.

Определяются границы рассеивания опытных данных, т.е. наибольшее t_{\max} и наименьшее t_{\min} их значения. Разность между ними является размахом варьирования

$$R = t_{\max} - t_{\min}. \quad (4)$$

Обосновывается количество интервалов k , на которое необходимо разбить размах варьирования R . Число k должно быть не менее

$$k = 1 + 3,32 \lg N, \quad (5)$$

где N – объем выборки испытаний.

Находится ширина интервала вариационного ряда h

$$h = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k} = \frac{R}{k}. \quad (6)$$

Определяются границы интервалов, для чего вначале устанавливается нулевое (крайнее) значение интервала t_0

$$t_0 = t_{\min} - h/2. \quad (7)$$

Следующие границы интервалов рассчитываются последовательным прибавлением величины интервала h к предыдущему значению, т.е.

$$t_1 = t_0 + h; t_2 = t_1 + h; \dots; t_k = t_{\max} + h.$$

В каждом интервале определяется его середина

$$\bar{t}_i = \frac{t_i + t_{i+1}}{2}. \quad (8)$$

Находятся опытные частоты \bar{m} , представляющие собой число попаданий опытных данных в каждый i -й интервал наработки.

В случае, когда отдельные результаты в выборке существенно отличаются по своей величине от остальных, что чаще всего объясняется ошибками испытаний, целесообразно проверить их на аномальность по какому-либо критерию. Из существующих методов проверки чаще всего используют критерий трех средних квадратических отклонений (критерий 3σ). В соответствии с ним результат испытаний, возникающий с вероятностью $P \leq 0,003$, относится к аномальному и его можно квалифицировать промахом. То есть сомнительный результат должен быть исключен из дальнейшего анализа, если его значение выходит за границы допустимой области рассеивания $\bar{t} \pm 3\sigma(t)$.

Исключив аномальные результаты (если они имеются), по формулам 1, 2 и 3 определяют числовые характеристики статистического ряда: среднее арифметическое $\bar{t}_{\text{ср}}$, среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации v .

Определяются опытные частоты w_i , отражающие вероятности попадания случайной величины t в заданные интервалы наработок

$$w_i = \frac{\bar{m}_i}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (9)$$

Найденные значения опытных частот w_i представляются графически в виде гистограммы. По оси абсцисс гистограммы откладываются интервалы наработок и на их основании строят прямоугольники, высоты которых соответствуют частотам w_i .

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за надежностью шаровых пальцев рулевого управления автобусов ЛиАЗ-5256 были получены их наработки до отказа в тыс. км. (табл. 1)

Таблица 1. Значения наработок шаровых пальцев до отказа, тыс. км

<p>14,9; 19,2; 21,2; 16,1; 22,9; 20,1; 22,4; 14,3; 12,8; 21,4; 18,8; 19,4; 19,6; 24,8; 19,9; 21,4; 21,6; 22,6; 20,0; 11,7; 20,7; 19,9; 24,1; 19,6; 17,0; 17,2; 21,0; 22,9; 20,3; 16,8; 16,6; 15,4; 21,7; 26,4; 26,6; 29,9; 15,0; 17,1; 17,8; 22,1; 21,1; 19,8; 15,6; 19,5; 23,9; 25,9; 18,6; 24,0; 19,3; 11,4; 23,3; 24,1; 21,9; 18,0; 27,3; 22,9; 19,9; 20,3; 22,6; 18,4; 21,3; 15,2; 18,6; 21,4; 15,8; 20,0; 27,6; 23,1; 17,3; 22,5; 24,6; 14,1; 30,6; 20,7; 21,0; 22,2; 19,9; 25,4; 16,8; 21,5</p>
--

1. Находим параметры статистического ряда распределения:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 30,6 - 11,4 = 19,2$ тыс.км.
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg N = 1 + 3,32 \lg 80 \approx 7$.
- ширину интервала $h = R/k = 19,2/7 \approx 3,0$ тыс.км.

Определяем границы интервалов, их средние значения и частоты попаданий опытных данных в интервалы наработок. Полученные результаты сведем в табл. 2.

Таблица 2. Параметры интервалов наработок шаровых пальцев рулевого управления автобусов

Параметр	Интервал наработки						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
Границы интервалов, тыс. км	10-13	13-16	16-19	19-22	22-25	25-28	28-31
Средины интервалов \bar{t}_i , тыс. км	11,5	14,5	17,5	21,5	23,5	26,5	29,5
Опытные частоты \bar{m}_i	3	8	15	29	17	6	2

2. Определяем числовые характеристики выборки:

$$\bar{t}_{\text{ср}} = 20,3 \text{ тыс. км}; \quad \sigma(t) = 3,9 \text{ тыс. км}; \quad v = 0,19$$

3. Строим гистограмму распределения частоты отказов шаровых пальцев по наработке t (рис. 2).

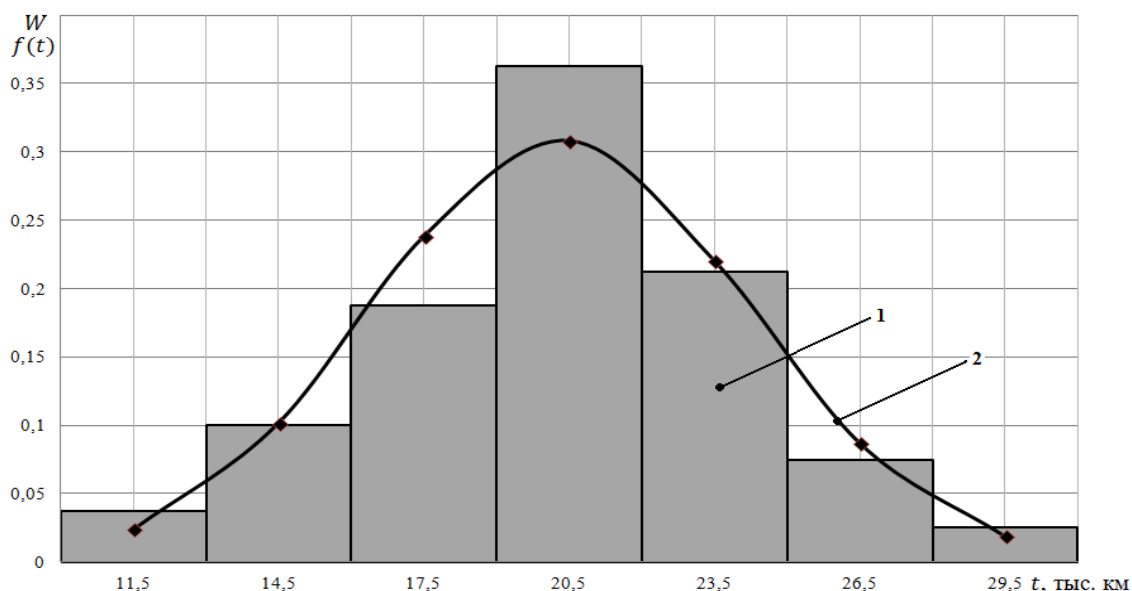


Рис. 2. Гистограмма 1 и теоретическая кривая распределения наработок до отказа шаровых пальцев рулевого управления автобусов ЛиАЗ – 5256

При обработке статистических данных возникает задача подбора теоретической кривой распределения к полученной гистограмме.

Сглаживание полученного статистического ряда теоретической кривой в настоящее время не требуют сложных и трудоемких расчетов, так как имеются современные компьютерные программы (STATISTICA, Microsoft Excel и др.), выполняющие эти операции с графическим представлением гистограмм и дифференциальных функций $f(t)$.

В первом приближении теоретический закон распределения случайной величины подбирается по виду гистограммы и значению коэффициента вариации v , характеризующего рассеивание случайной величины относительно среднего значения. *Нормальному закону распределения*, например, соответствует значение коэффициента вариации $v = 0,10 \dots 0,35$; *распределению Вейбулла* – $v = 0,4 \dots 0,8$; *экспоненциальному* – $v = 0,8 \dots 1,2$.

В приведенном примере вид полученной гистограммы и значение коэффициента вариации $v = 0,19$ позволяет предположить, что теоретическая кривая распределения наработок до отказа шаровых пальцев рулевого управления автобусов ЛиАЗ – 5256 (кривая 2) подчиняется нормальному закону.

Результаты расчетов вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ на наработках, соответствующих серединам интервалов сведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения функций распределения отказов шаровых пальцев рулевого управления автобусов

Функция	Интервал						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
$P(t_i)$	0,98	0,93	0,76	0,485	0,21	0,06	0,01
$F(t_i)$	0,02	0,07	0,24	0,515	0,79	0,94	0,99

По найденным значениям $P(t)$ и $F(t)$ строим соответствующие графики этих функций (рис. 3).

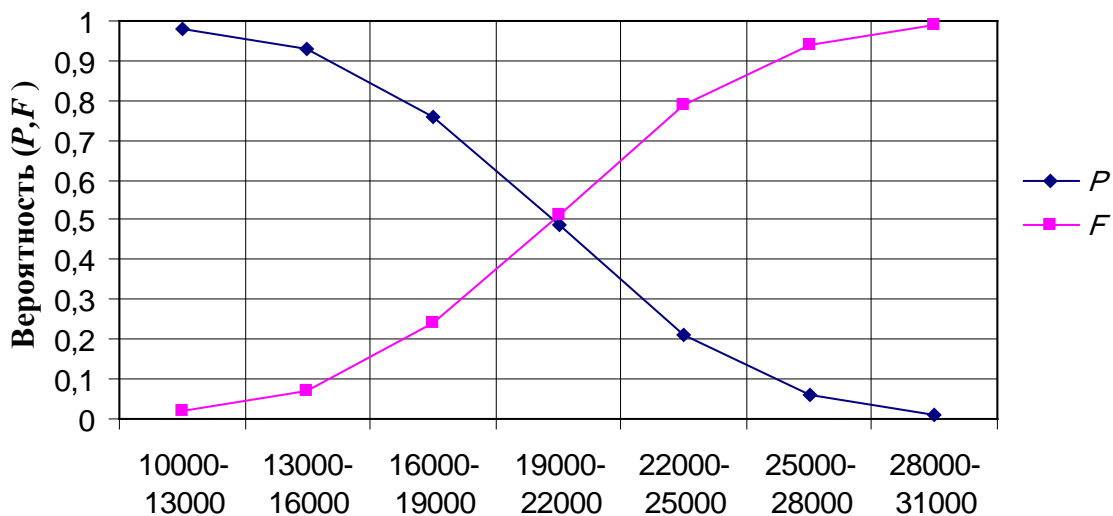


Рис. 3. Графики функций вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ шаровых пальцев рулевого управления автобусов

Выполнение работы

После изучения указаний студент получает *персональные статистические данные* по эксплуатационной надежности агрегатов, узлов или систем автомобиля и выполняет расчеты показателей надежности.

По завершении занятий оформляется отчет о выполненной работе и осуществляется его защита.

Продолжительность работы 2 часа.

Задание. По заданному вариационному ряду рассчитать показатели надежности.

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- числовые характеристики случайных величин;

- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов показателей надежности;
- подбор закона распределения;
- гистограмма распределения наработок до отказа, графики распределения вероятностей безотказной работы $P(t_i)$ и отказов $F(t_i)$;
- заключение и выводы по надежности исследуемого изделия.

Контрольные вопросы

1. Числовые характеристики, оценивающие надежность машин. Приведите формулы для их расчета.
2. Раскройте сущность законов распределения случайных величин.
3. Приведите порядок обработки экспериментальных данных.
4. Как определяются опытные частоты, отражающие вероятности попадания случайной величины в заданные интервалы наработок?

1	6,63	3,84	2,71	1,64	11	24,7	19,7	17,3	14,6
2	9,21	5,99	4,61	3,22	12	26,2	21,0	18,5	15,8
3	11,3	7,81	6,25	4,64	13	27,7	22,4	19,8	17,0
4	13,3	9,49	7,78	5,99	14	29,1	23,7	21,1	18,2
5	15,1	11,1	9,24	7,29	15	30,6	25,0	22,3	19,3
6	16,8	12,6	10,6	8,56	16	32,0	26,3	23,5	20,5
7	18,5	14,1	12,0	9,80	17	33,4	27,6	24,8	21,6
8	20,1	15,5	13,4	11,0	18	34,8	28,9	26,0	22,8
9	21,7	16,9	14,7	12,2	19	36,2	30,1	27,2	23,9
10	23,2	18,3	16,0	13,4	20	37,6	31,4	28,4	25,0

Проверку гипотезы о принадлежности статистического распределения выбранному закону с помощью критерия χ^2 осуществляют следующим образом:

- по построенной гистограмме и коэффициенту вариации v подбирают закон распределения случайной величины;
- находят вероятности попадания случайной величины (теоретические частоты) в каждый интервал статистического ряда;
- по формуле (10) определяют опытное значение критерия $\chi^2_{\text{опытн}}$;
- определяют число степеней свободы ($S = k - r - 1$);
- для найденного S и принятого уровня значимости α находят табличное значение критерия $\chi^2_{\text{табл}}$;
- сравнивают вычисленное значение критерия $\chi^2_{\text{опыт}}$ с табличным $\chi^2_{\text{табл}}$.

Если $\chi^2_{\text{опыт}} \leq \chi^2_{\text{табл}}$, гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому вероятностному закону не отвергается, т.е. расхождение между опытными и теоретическими частотами незначительно. В противном случае гипотеза отвергается.

Выполнение работы

После изучения указаний студент получает *персональные статистические данные* по эксплуатационной надежности агрегатов, узлов или систем автомобиля и выполняет необходимые расчеты.

По завершении занятий оформляется отчет о выполненной работе и осуществляется его защита.

Продолжительность работы 4 часа.

Задание. По заданному вариационному ряду рассчитать показатели надежности, установить закон распределения наработок до отказа, проверить правильность выбранного закона с помощью критерия χ^2 Пирсона, построить графики функций распределения $P(t)$ и $F(t)$.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за двигателями ЗМЗ-406 были выявлены наработки до отказа вкладышей

коренных шеек коленчатого вала (табл. 2). Требуется установить закон распределения, проверить гипотезу о принадлежности статистических данных выбранному закону, определить основные параметры распределения отказов по наработке.

Таблица 2. Значения наработок вкладышей коренных шеек коленчатого вала

90, 95, 120, 115, 112, 122, 105, 116, 108, 129, 130, 145, 128, 142, 144, 148, 140, 139, 174, 168, 171, 173, 168, 155, 169, 170, 191, 180, 186, 198, 190, 194, 179, 178, 204, 162,170,156,211, 203, 217, 221, 228, 231, 236, 250, 232.

Расчеты выполнены с использованием программы Excel по вышеизложенной методике.

1. Находим параметры статистического ряда распределения:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 250 - 90 = 160$ тыс. км;
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg 47 = 6,5514 \approx 7$;
- величину интервала $h = R/k = 160/7 \approx 25$ тыс. км;
- середины интервалов (тыс. км): $\bar{t}_1 = 87,5$; $\bar{t}_2 = 112,5$; $\bar{t}_3 = 137,5$;
 $\bar{t}_4 = 162,5$; $\bar{t}_5 = 187,5$; $\bar{t}_6 = 212,5$; $\bar{t}_7 = 237,5$.
- частоту попаданий наработок в эти интервалы: $\bar{m}_1 = 2$; $\bar{m}_2 = 7$; $\bar{m}_3 = 9$;
 $\bar{m}_4 = 11$; $\bar{m}_5 = 8$; $\bar{m}_6 = 5$; $\bar{m}_7 = 5$.

2. Определяем числовые характеристики выборки:

$$\bar{t}_{\text{ср}} = 166 \text{ тыс. км}; \quad \sigma(t) = 40,6 \text{ тыс. км}; \quad v = 0,24$$

3. Строим гистограмму распределения частоты отказов вкладышей по наработке t (рис. 1).

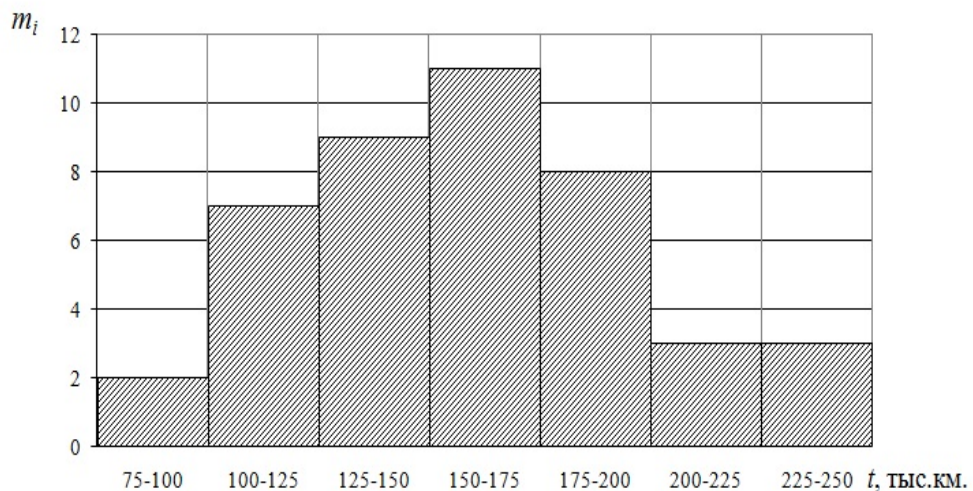


Рис.1. Гистограмма распределения отказов вкладышей коренных шеек коленчатого вала по наработке

Вид гистограммы и значение коэффициента вариации $v = 0,24$ позволяют предположить, что отказы вкладышей распределяются по нормальному закону.

4. Определяем вероятности попадания случайных величин наработок (теоретические частоты) в каждый интервал статистического ряда.

Для нормального закона распределения с целью удобства вычислений проводим нормирование случайной величины наработки t , которая заключается в переходе к новой случайной величине, $z = \frac{t - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}$ и вычисляем

границы новых интервалов:

$$z_i = \frac{t_i - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}; \quad z_{i+1} = \frac{t_{i+1} - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)} .$$

Расчеты сводим с таблицу 3, полагая при этом, что левый конец первого интервала равен $-\infty$, а правый конец последнего интервала ∞ .

Таблица 3. Границы интервалов случайной величины z

Интервал	Границы интервала t_i		$t_i - \bar{t}_{cp}$	$t_{i+1} - \bar{t}_{cp}$	Границы интервала z_i	
	t_i	t_{i+1}			$z_i = \frac{t_i - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}$	$z_{i+1} = \frac{t_{i+1} - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}$
1-й	75	100	-	- 66	$-\infty$	-1,63
2-й	100	125	-66	-41	-1,63	-1,01
3-й	125	150	-41	-16	-1,01	-0,40
4-й	150	175	-16	9	-0,40	0,22
5-й	175	200	9	34	0,22	0,84
6-й	200	225	34	59	0,84	1,46
7-й	225	250	59	-	1,46	∞

5. Рассчитываем теоретические частоты $m_i = Np_i$, где $p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$ – вероятность попадания наработки t в интервалы (t_i, t_{i+1}) ; $\Phi(z)$ – функция Лапласа.

Результаты расчета сведены в табл. 4.

Таблица 4. Теоретические частоты попадания наработок в интервалы

Интервал	Границы интервала		$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	$m_i = Np_i$
	z_i	z_{i+1}				
1-й	$-\infty$	-1,63	-0,5000	-0,4484	0,0516	2,43
2-й	-1,63	-1,01	-0,4484	-0,3438	0,1046	4,92
3-й	-1,01	-0,40	-0,3438	-0,1554	0,1884	8,85
4-й	-0,40	0,22	-0,1554	0,0871	0,2425	11,40

5-й	0,22	0,84	0,0871	0,2995	0,2124	9,98
6-й	0,84	1,46	0,2995	0,4279	0,1284	6,03
7-й	1,46	∞	0,4279	0,5000	0,0721	3,38

6. Рассчитываем критерий согласия χ^2 Пирсона (расчеты сведены в табл. 5).

Таблица 5. Результаты расчета критерия χ^2

Интервал	\bar{m}_i	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1-й	2	2,43	-0,43	0,1849	0,0761
2-й	7	4,92	2,08	4,3264	0,8793
3-й	9	8,85	0,15	0,0225	0,0025
4-й	11	11,40	-0,40	0,1600	0,0140
5-й	8	9,98	-1,98	3,9204	0,3928
6-й	5	6,03	-1,03	1,0609	0,1759
7-й	5	3,38	1,62	2,6244	0,7764
Σ	47				$\chi^2_{\text{опыт.}} = 2,317$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $S = k - r - 1 = 6 - 1 - 1 = 4$ табличное значение $\chi^2_{\text{табл.}} = 9,49$. Так как $\chi^2_{\text{опыт.}} < \chi^2_{\text{табл.}}$, гипотеза о принадлежности выборочных данных нормальному закону распределения принимается.

6. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы $P(t)$ и отказов $F(t)$ по интервалам наработок приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты расчетов значений функций распределения $P(t)$ и $F(t)$ по интервалам наработок

Функция	Интервал						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
$P(t_i)$	0,9742	0,9040	0,7580	0,5030	0,2980	0,1260	0,0392
$F(t_i)$	0,0258	0,0960	0,2420	0,4970	0,7020	0,8740	0,9608

7. По найденным интервальным значениям $P(t_i)$, $F(t_i)$ строим графики функций их распределения (рис. 2).

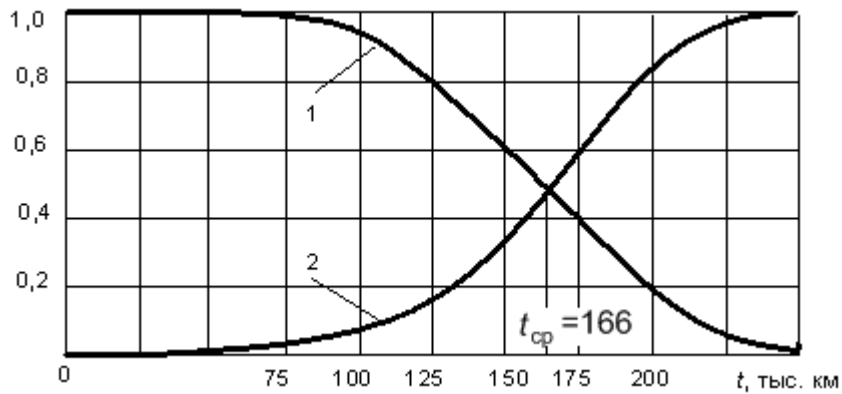


Рис. 2. График функции вероятности безотказной работы (1) и вероятности отказов (2) вкладышей шеек коленчатого вала

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов показателей надежности;
- гистограмму распределения наработок до отказа;
- подбор закона распределения;
- расчет критерия χ^2 Пирсона;
- графики распределения вероятностей безотказной работы $P(t)$ и отказов $F(t)$.

Контрольные вопросы

1. Порядок построения гистограммы распределения наработок до отказа.
2. Что лежит в основе выбора закона распределения наработок до отказа?
3. Как осуществляется проверка принадлежности опытных данных выбранному закону распределения?

Работа № 4

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО ЗАКОНУ ВЕЙБУЛЛА

Цель работы – изучить:

- порядок обработки результатов испытаний, распределенных по закону Вейбулла;
- проверку принадлежности экспериментальных данных закону распределения Вейбулла с помощью критерия согласия χ^2 Пирсона.

Общие сведения

Непрерывная случайная величина t называется распределенной по закону Вейбулла, если ее плотность распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \text{ при } t > 0$$

где a – параметр масштаба распределения, характеризующий растянутость кривых наработки t вдоль оси абсцисс; b – параметр формы распределения.

Распределение Вейбулла – гибкое распределение и часто принимается в качестве статистической модели для описания самых разнообразных отказов. Хорошо оно проявляется в модели «слабого звена». Например, в двигателе, кроме блока цилиндров, картера, коленчатого вала, поршней, шатунов входят менее долговечные детали: поршневые кольца, вкладыши, прокладки, уплотнения и др. Они отказывают в разные сроки, а наработка двигателя на отказ определяется отказом наиболее слабого звена.

Поэтому распределение Вейбулла занимает особое место при оценке ресурсов работы многих узлов и агрегатов автомобиля. При этом в зависимости от параметра b оно может принимать самые разнообразные формы.

При $b < 1$ – это убывающая функция; при $b \approx 1$ – совпадает с экспонентой; при $b \approx 3,0$ – совпадает с нормальным распределением.

В инженерных расчетах параметры распределения Вейбулла t_{cp} и $\sigma(t)$ определяются по формулам:

$$t_{cp} = a k_B ; \quad \sigma(t) = a q_B,$$

где k_B и q_B – коэффициенты, определяемые из выражений:

$$k_B = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad q_B = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - k_B^2},$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция, значения которой приведены в таблицах математической статистики.

Коэффициент вариации определяется по формуле:

$$v = \frac{\sigma}{t_{\text{ср}}} = \frac{aq_B}{ak_B} = \frac{q_B}{k_B}.$$

Из математической статистики известно, что параметр формы распределения Вейбулла b является функцией коэффициента вариации v , т.е.

$$b = f(v) = f\{\sigma(t) / t_{\text{ср}}\}.$$

Для удобства вычислений при определении параметра формы b , а также коэффициентов k_B и q_B в зависимости от коэффициента вариации v в работах по математической статистике имеются специальные таблицы (для некоторых значений коэффициента v они приведены в табл.1).

Таблица 1. Зависимость параметра распределения b и коэффициентов k_B и q_B от коэффициента вариации v

Коэффициент вариации v	Параметр распределения b	Коэффициенты	
		k_B	q_B
0,120	10,0	0,951	0,114
0,170	6,9	0,935	0,159
0,200	5,8	0,926	0,184
0,281	4,0	0,906	0,255
0,315	3,5	0,900	0,285
0,365	3,0	0,893	0,326
0,410	2,7	0,890	0,350
0,500	2,1	0,886	0,443

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность возникновения отказа $F(t)$ до этой наработки находятся по формулам:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}; \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}.$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность вероятностей распределения $f(t)$ по интервалам наработки t_i определяются по формулам:

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}; \quad f(t_i) = P(t_i) / \lambda(t_i).$$

Выполнение работы

После изучения указаний студент получает *персональные статистические данные* по эксплуатационной надежности агрегатов, узлов или систем автомобиля, выполняет необходимые расчеты показателей надежности, подбирает закон распределения наработок до отказа и проверяет гипотезу о правильности выбранного закона по критерию согласия.

По завершении занятий оформляется отчет о выполненной работе и осуществляется его защита.

Продолжительность работы 4 часа.

Задание. По заданному вариационному ряду рассчитать показатели надежности, проверить правильность выбранного закона с помощью критерия χ^2 Пирсона, построить графики интенсивности отказов $\lambda(t)$ и плотности вероятностей распределения $f(t)$ по интервалам наработки t_i .

Пример. По результатам эксплуатационных испытаний 50 автомобилей средней грузоподъемности установлены наработки до предельного состояния ведомых дисков сцепления (табл. 2).

Таблица 2. Значения наработок до отказа ведомых дисков сцепления

36; 34; 65; 45; 56; 32; 42; 82; 55; 24; 65; 44; 61; 67; 43; 61; 18; 32; 45; 29; 52; 53; 75; 21; 102; 44; 71; 31; 96; 59; 69; 19,2; 66; 75; 47; 41; 72; 33; 115; 43; 88; 55; 47; 68; 30; 54; 42; 50; 81; 15
--

1. Определяем параметры статистического ряда распределения

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 115 - 15 = 100$ тыс. км;
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg 47 = 6,6406 \approx 7$;
- величина интервала $h = R/k = 100/7 \approx 15$ тыс. км;
- середины интервалов (тыс. км): $\bar{t}_1 = 22,5$; $\bar{t}_2 = 37,5$; $\bar{t}_3 = 52,5$; $\bar{t}_4 = 67,5$;
 $\bar{t}_5 = 82,5$; $\bar{t}_6 = 97,5$; $\bar{t}_7 = 112,5$;

- частоты попаданий наработок в эти интервалы: $\bar{m}_1 = 6$; $\bar{m}_2 = 14$; $\bar{m}_3 = 12$; $\bar{m}_4 = 9$; $\bar{m}_5 = 6$; $\bar{m}_6 = 2$; $\bar{m}_7 = 1$.

2. Определяем числовые характеристики выборки:

$$\bar{t}_{\text{ср}} = 54 \text{ тыс. км}; \quad \sigma(t) = 22,4 \text{ тыс. км}; \quad \nu = 0,41.$$

3. Строим гистограмму распределения частоты отказов (рис. 1). По виду гистограммы и коэффициенту корреляции $\nu = 0,41$ предполагаем, что отказы ведомых дисков согласуются с законом Вейбулла.

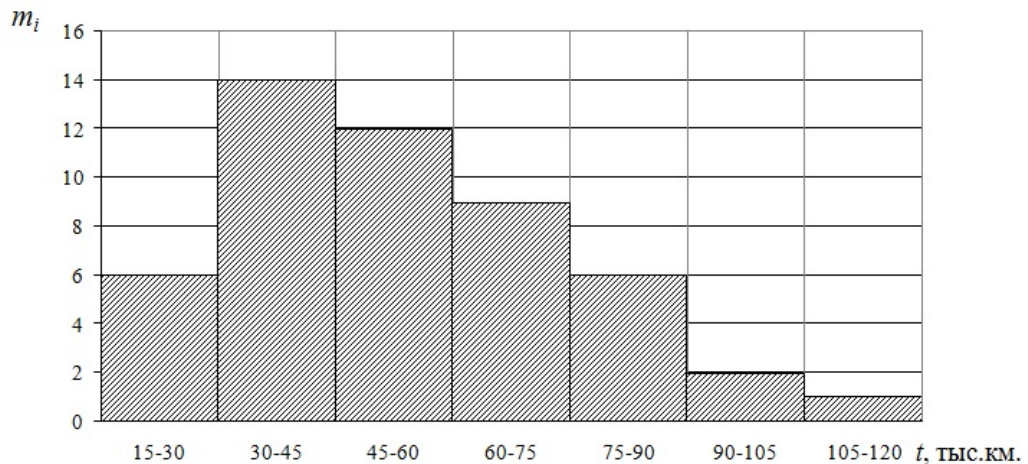


Рис.1. Гистограмма распределения отказов ведомых дисков сцепления автомобилей

4. По таблице значений параметров распределения Вейбулла для коэффициента вариации $\nu = 0,41$ находим:

- параметр формы распределения $b = 2,7$;
- коэффициенты $k_b = 0,890$ и $q_b = 0,350$;
- параметр масштаба распределения $a = \bar{t}_{\text{ср}}/k_b = 60,7$ тыс. км

5. Определяем теоретические вероятности попадания случайной величины t_i в интервалы наработки

$$p_i(t_i < t < t_{i+1}) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} - e^{-\left(\frac{t_{i+1}}{a}\right)^b}.$$

$$P(t_1) = 0,12; \quad P(t_2) = 0,224; \quad P(t_3) = 0,263; \quad P(t_4) = 0,210; \quad P(t_5) = 0,110; \quad P(t_6) = 0,038; \quad P(t_7) = 0,035.$$

6. Вычисляем теоретические частоты попадания отказов в интервалы наработки $m_1 = p(t_1) \cdot N$:

$$m_1 = 6; \quad m_2 = 11,2; \quad m_3 = 13,2; \quad m_4 = 10,5; \quad m_5 = 5,5; \quad m_6 = 1,9; \quad m_7 = 1,8.$$

7. Проверяем гипотезу о распределении наработок ведомых дисков до отказа по закону Вейбулла по критерию согласия χ^2 Пирсона (табл. 3).

Таблица 3. Результаты расчета критерия χ^2 Пирсона

i	\bar{m}_i	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1	6	6	0	0	0
2	14	11,2	2,8	7,84	0,7
3	12	13,15	1,15	1,3225	0,1
4	9	10,5	1,5	2,25	0,214
5	6	5,5	0,5	0,25	0,045
6	2	1,9	0,1	0,01	0,005
7	1	1,825	0,825	0,681	0,373
Σ	50				$\chi^2_{\text{опыт}} = 1,44$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $S = 4$ критерий $\chi^2_{\text{табл}} = 9,49$. Следовательно гипотеза о принадлежности опытных данных закону Вейбулла не отвергается, так как $\chi^2_{\text{опыт}} < \chi^2_{\text{табл}}$.

8. Определяем вероятности отказа $F(t)$, безотказной работы $P(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность вероятностей распределения $f(t)$ по интервалам наработки t_i

$$F(t_i) = \sum_1^i p(t_i); \quad P(t_i) = 1 - F(t_i).$$

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1}; \quad f(t_i) = P(t_i) / \lambda(t_i).$$

Результаты расчета сведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета функций распределения

Функция распределения	Интервал наработки						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
$F(t_i)$	0,12	0,344	0,607	0,817	0,927	0,965	1,0
$P(t_i)$	0,88	0,656	0,393	0,183	0,073	0,035	0
$\lambda(t)$	0,0083	0,0200	0,0348	0,054	0,076	0,101	0,128
$f(t_i)$	0,0073	0,0131	0,0137	0,010	0,006	0,003	0

Графическое изображение кривых $\lambda(t)$ и $f(t)$ представлено на рис. 2.

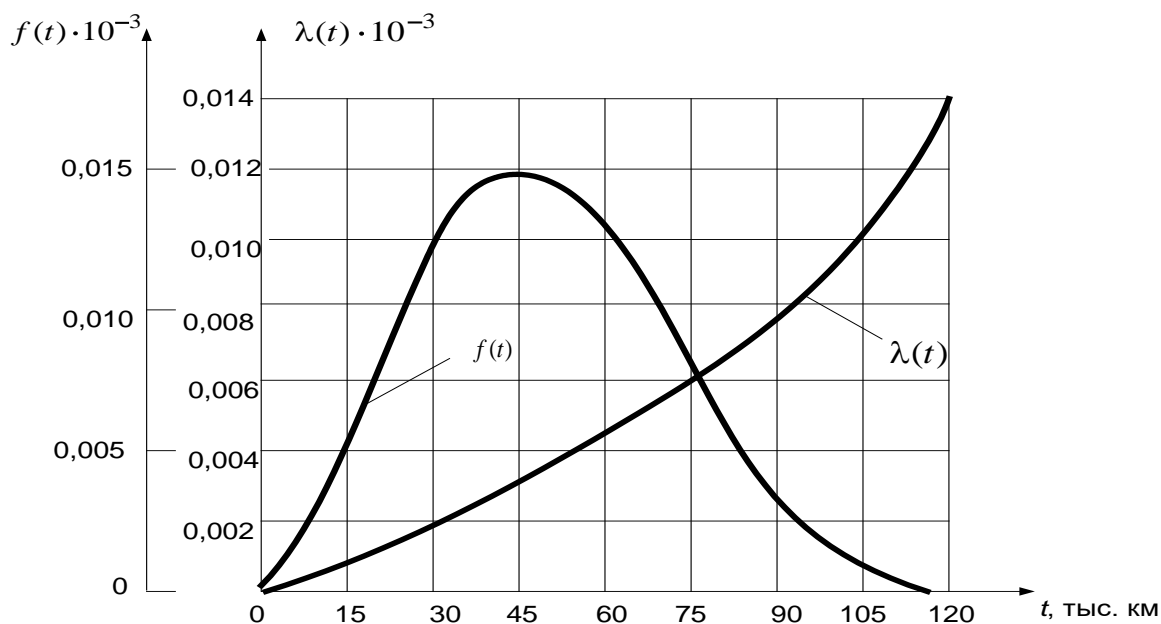


Рис.2. Графики плотности распределения $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ ведомых дисков сцепления

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов показателей надежности;
- подбор закона распределения;
- гистограмму распределения наработок до отказа, графики распределения вероятностей безотказной работы $P(t)$ и отказов $F(t)$;
- проверку гипотезы о принадлежности опытных данных закону распределения Вейбулла по критерию согласия χ^2 Пирсона.

Контрольные вопросы

1. Для описания каких отказов используется закон распределения Вейбулла?
2. Постройте графики интегральной функции распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работ $P(t)$ для закона распределения Вейбулла.
3. Что лежит в основе выбора гипотезы о законе распределения отказов?

Работа № 5

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

Цель работы – изучить:

- схемы соединения конструктивных элементов агрегатов, узлов и систем машин;
- методику расчета надежности с помощью структурных схем.

Общие сведения

На начальной стадии создания машины (проектирование) основным источником об уровне ожидаемой надежности являются результаты конструкторских расчетов и статистические данные об его аналогах. В настоящее время разработано достаточно много методик расчетов конструктивных элементов и их соединений на прочность, долговечность, износостойкость материалов, выносливость при различных режимах их нагружения. Так, например, проводятся прогнозные расчеты надежности валов и осей, зубчатых и червячных механизмов, подшипников скольжения и качения, разъемных и неразъемных соединений, уплотнительных элементов и др.

При прогнозном расчете и анализе показателей надежности узлов, агрегатов и машин в целом широко используется *метод структурных схем*. Сущность метода заключается в том, что выполняющие определенные функции конструктивные элементы технической системы или отдельного узла в результате их последовательного или параллельного соединения представляются в виде расчетной конструктивной схемы.

Последовательным называют схему соединения конструктивных элементов, при которой необходимым и достаточным условием нарушения работоспособности является отказ хотя бы одного из них (рис.1,*a*). Нарботка до отказа системы при таком соединении равна наработке до отказа того элемента, у которого она окажется минимальной:

$$t_c = \min (t_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где n – количество элементов системы.

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из n последовательно соединенных элементов, в соответствии с теоремой умножения независимых событий равна

$$P(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (2)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – вероятности безотказной работы элементов, входящих в систему, за наработку t .

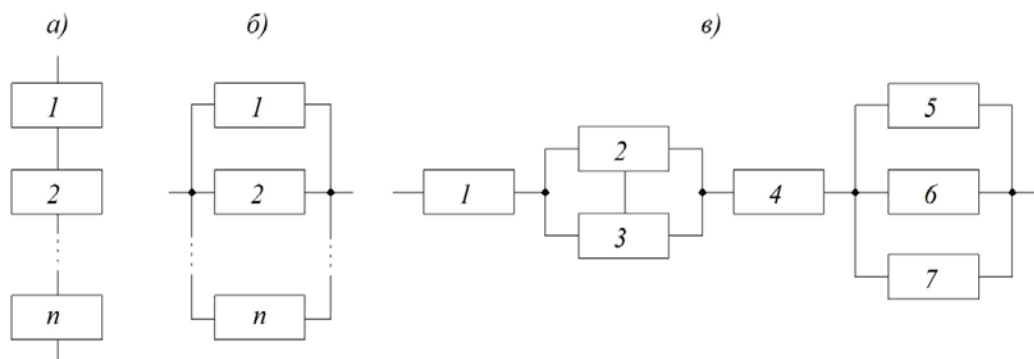


Рис. 1. Схемы соединения конструктивных элементов:

a – последовательное; b – параллельное; v – смешанное

Параллельным называют схему соединения, работоспособность которой нарушается при отказе всех входящих в нее конструктивных элементов (рис.1, b). Нарботка до отказа такой системы равна максимальной наработке входящих в нее элементов

$$t_c = \max(t_i), i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Вероятность безотказной работы системы при параллельном соединении элементов составляет

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (4)$$

В реальных технических системах схема соединения конструктивных элементов чаще всего представлена в виде совокупности последовательных и параллельных подсистем (рис.1, v). Такая схема соединения носит название *смешанной*. При расчете надежности при такой схеме соединения сначала определяют вероятности безотказной работы ее подсистем, а затем – вероятность безотказной работы всей технической системы. Например, для схемы соединения, показанной на рис.1, v , вероятность безотказной работы составит:

$$P(t) = P_1(t)\{1 - [1 - P_2(t)][1 - P_3(t)]\} P_4(t)\{1 - [1 - P_5(t)] [1 - P_6(t)] [1 - P_7(t)]\}. \quad (5)$$

Выполнение работы

Для предложенной преподавателем принципиальной схемы изделия составить его структурную схему и рассчитать вероятность безотказной работы.

По завершении занятий оформляется отчет о выполненной работе и осуществляется его защита.

Продолжительность работы 4 часа.

Задание. По заданной принципиальной схеме узла или системы АТС рассчитать их безотказную работу.

Пример. Рассчитать структурную надежность тормозной системы (ТС) переднеприводного легкового автомобиля, оснащенного АБС.

При расчете надежности проектируемое техническое устройство представляется в виде единой структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных соединений конструктивных элементов, выражающих при этом события их безотказности. ТС включает в себя гидроагрегат и четыре датчика скорости вращения колес. На рис. 2 показана ее принципиальная (монтажная) схема.

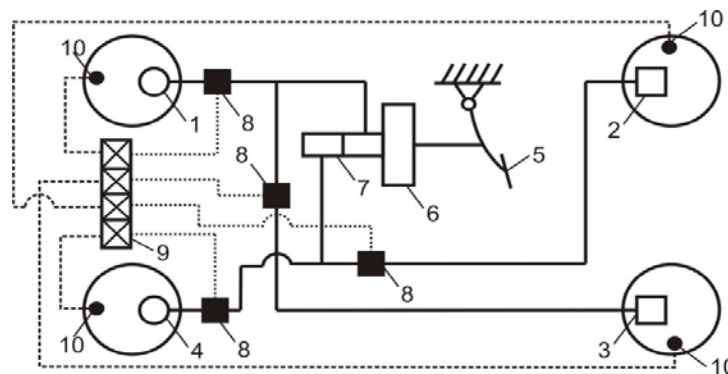


Рис.2. Принципиальная схема тормозной системы автомобиля ВАЗ-21703-01-018: 1,4 – дисковый тормозной механизм; 2,3 – барабанный тормозной механизм; 5 – педаль; 6 – вакуумный усилитель; 7 – главный тормозной цилиндр; 8 – модулятор; 9 – блок управления АБС; 10 – датчик

На основе анализа принципиальной схемы ТС и функционального назначения входящих в нее элементов составляем расчетную структурную схему надежности ТС (рис.3). Поскольку АБС при возникновении в ней отказа не влияет на работоспособность ТС, то ее конструктивные элементы можно исключить из структурной схемы.

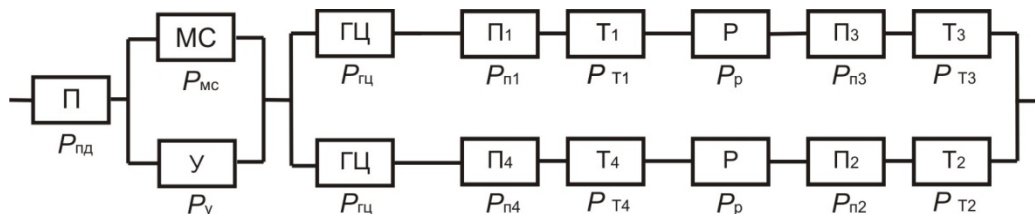


Рис.3. Структурная схема двухконтурной тормозной системы автомобиля ВАЗ-21703-01: П – педаль; МС – механическая связь; У – усилитель; ГЦ – главный тормозной цилиндр; П_і – тормозной привод колеса (рабочий цилиндр с трубопроводом); Т_і – тормозной механизм колеса; Р – регулятор тормозных сил.

Для количественной оценки надежности рассматриваемой тормозной системы составляем расчетное уравнение вероятности ее безотказной работы:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{но}} \cdot (1 - (1 - P_{\text{мс}}) \cdot (1 - P_{\text{у}})) \cdot (1 - (1 - P_{\text{гц}} \cdot P_{\text{пи}}^2 \cdot P_{\text{ти}}^2)^2) \quad (6)$$

При оценке структурной надежности сборочных единиц машин необходимо иметь достоверные количественные характеристики надежности каждого входящего в них элемента. Такие характеристики получают по результатам различных видов испытаний или эксплуатационных наблюдений. При отсутствии такой информации можно решить обратную задачу – зная требуемый уровень безотказной работы рассматриваемого объекта, определяют этот показатель для каждого элемента, входящего в структурную схему.

Для узлов и систем автомобилей, непосредственно обеспечивающих безопасность движения, допустимый уровень безопасной работы принимается равным $P(t) = 0,95$. Обеспечение такого уровня требует более высокого уровня $P(t)$, входящих в них элементов. В рассматриваемом примере принимаем значение вероятности безотказной работы элементов ТС $P(t) = 0,99$.

Используя формулу (6), определим вероятности безотказной работы ТС

$$P_{\text{общ}} = 0,99 \cdot ((1 - (1 - 0,99) \cdot (1 - 0,99))) \cdot (1 - (1 - (0,99 \cdot 0,99^2 \cdot 0,99^2)^2)) = 0,900.$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- схемы соединения конструктивных элементов изделий;
- принципиальную и структурную схемы изделия;
- результаты расчета вероятности безотказной работы;
- заключение и выводы.

Контрольные вопросы

1. Раскройте сущность метода структурных схем при расчете надежности изделий.
2. Перечислите основные способы соединения конструктивных элементов машин.
3. Как определяется надежность изделий при последовательном и параллельном соединении элементов?

Работа № 6

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Цель работы – изучить:

- способы резервирования, как метода повышения надежности;
- определение надежности тормозных систем автомобилей.

Общие сведения

Надежность любой технической системы, состоящей из заданного числа элементов, зависит не только от надежности каждого из них, но и от способа их соединения. Анализ схемы соединения топливных фильтров двигателя (рис. 1, а), например, включающий фильтры грубой 1 и тонкой 2 очистки, показывает, что при засорении (отказе) любого из них нарушается подача топлива. Такое соединение конструктивных элементов, когда отказ одного из них вызывает отказ системы в целом, называется последовательным.

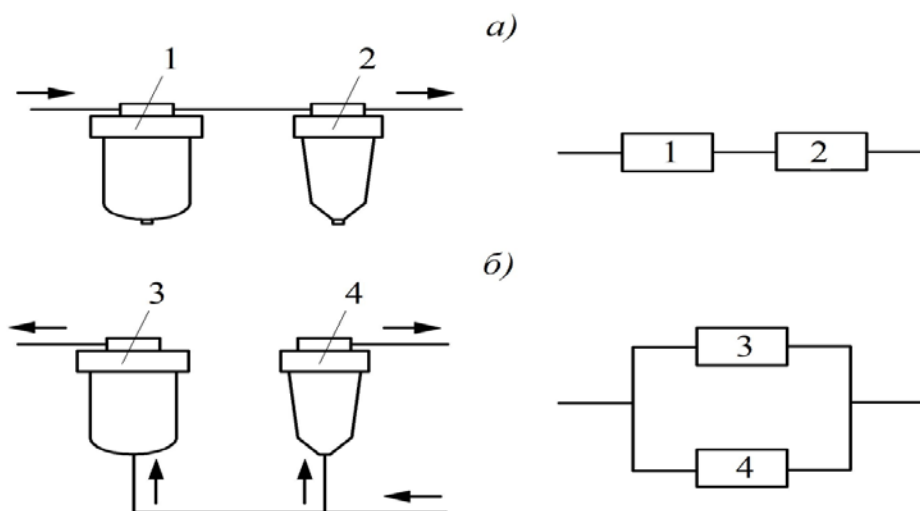


Рис. 1. Схемы соединения фильтров:

а - в системе питания; б - в системе смазки

Если вероятности безотказной работы каждого из фильтров в пределах заданной наработки равна P_1 и P_2 , то вероятность безотказной работы системы очистки топлива в целом определяется из выражения

$$P(t) = P_1 P_2. \quad (1)$$

Соединение масляных фильтров грубой 3 и тонкой 4 очистки системы смазки двигателя конструктивно выполнено по другой схеме (рис. 7.5, б). Фильтры работают независимо один от другого, и отказ одного из них не отражается на работе другого. Такое включение фильтров считается параллельным. Вероятность безотказной работы фильтров при такой системе соединения определяется по формуле

$$P(t) = 1 - (1 - P_3)(1 - P_4), \quad (2)$$

где P_3, P_4 – вероятности безотказной работы фильтров тонкой и центробежной очистки соответственно.

Анализ последней формулы показывает, что параллельное соединение элементов значительно повышает безотказную работу, следовательно, и надежность всей системы. Если, например, вероятность безотказной работы каждого фильтра принять равной $P = 0,9$, то вероятность безотказной работы системы очистки масла составит: $P(t) = 1 - (0,1)^2 = 0,99$, т.е. существенно выше каждого из входящих в нее фильтров. Поэтому параллельное включение элементов системы является основой весьма важного метода повышения надежности – резервирования.

В соответствии с ГОСТ 27.002 – 89 **резервирование** – это способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций. Если избыточность достигается использованием дополнительных элементов структуры объекта, то такое резервирование называют структурным.

При структурном резервировании конструктивные элементы машины могут быть основными и резервными. *Основным* называют элемент структуры объекта, необходимый для выполнения объектом заданных функций без использования резерва. *Резервный* элемент предназначен для обеспечения работоспособности объекта при отказе основного элемента.

В случае, когда резервный элемент работает в том же режиме, что и основной, он считается *нагруженным*. Если резервный элемент работает с меньшей интенсивностью, чем основной, такой режим нагружения носит название *облегченного*. Резервный элемент при таком резервировании включается в режим работы основного элемента только в момент отказа последнего.

Резервирование может быть и *ненагруженным*, если резервный элемент не работает до тех пор, пока не отказал основной.

К резервированию прибегают, в основном, при разработке систем, состоящих из последовательно соединенных конструктивных элементов. При этом возможны несколько вариантов их резервирования.

Раздельное резервирование, обеспечивающее включение резервных элементов при отказе отдельных основных элементов системы.

Общее резервирование, при котором в случае отказа любого элемента основной системы включается резервная система, полностью заменяющая работу основной.

Использование структурной избыточности при резервировании ведет к усложнению системы, её удорожанию. В связи с этим резервирование используют в системах, к которым предъявляются повышенные требования к надежности. В автомобильной технике это, в основном, рулевые и тормозные системы, отказы которых приводят к аварийным ситуациям. По статистике отказы тормозных систем приводят к наиболее серьезным дорожно-транспортным происшествиям с тяжелыми последствиями, поэтому для повышения надежности используют различные варианты их резервирования.

Современные автомобили оборудуются запасными тормозными системами, которые включаются в работу при отказе рабочей системы. Для повышения безопасности в автомобилях с гидравлическим приводом рабочая тормозная система выполняется по схеме с двумя независимыми контурами, что позволяет сохранять работоспособность при отказе одного из них.

Схемы разнесения независимых контуров, включающие в себя секции главного тормозного цилиндра и колесные цилиндры, могут быть различными. На рис 2, а в один контур объединены первая секция главного тормозного цилиндра 1 и колесные цилиндры передних тормозов. Второй контур включает вторую секцию главного цилиндра 2 и цилиндры задних колес. На рис. 2, б показана диагональная схема разделения контуров, при которой один из них объединяет колесные цилиндры правого переднего и левого заднего тормозов, а второй – колесные цилиндры левого переднего и правого заднего тормозных механизмов.

Такие структурные схемы соединений тормозной системы являются параллельными. Вероятность безотказной работы тормозной системы $P(t)$, выполненная по одной из таких схем, определяется по формуле (2).

Если принять условно вероятности безотказной работы обоих контуров равными $P_1 = P_2 = 0,9$, то

$$P(t) = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = 0,99.$$

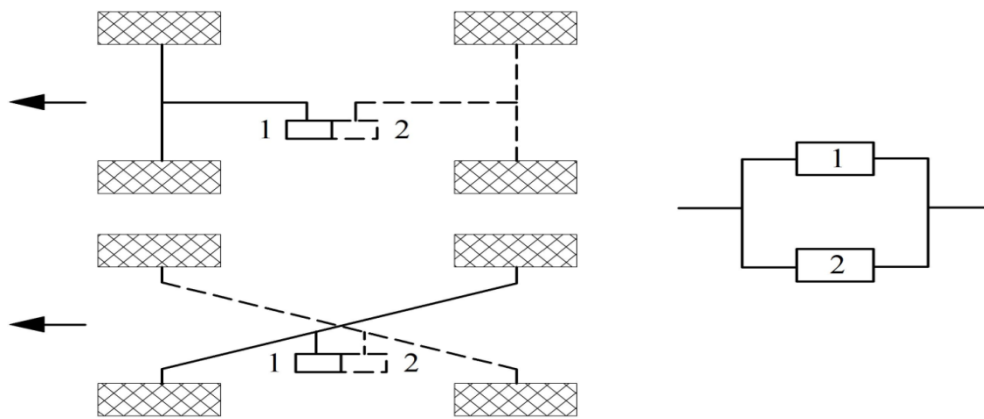


Рис. 2. Схемы тормозных систем с осевым (а) и диагональным (б) разделением контуров

Очевидный недостаток этих схем состоит в том, что отказ любого контура снижает эффективность торможения автомобиля, так как тормозные механизмы одного из контуров не участвуют в торможении.

На рис. 3 показана схема тормозной системы с резервированием одного из контуров (передних дисковых тормозов). Дисковые тормоза при этом являются составной частью тормозного механизма, как основной тормозной системы, так и резервной.

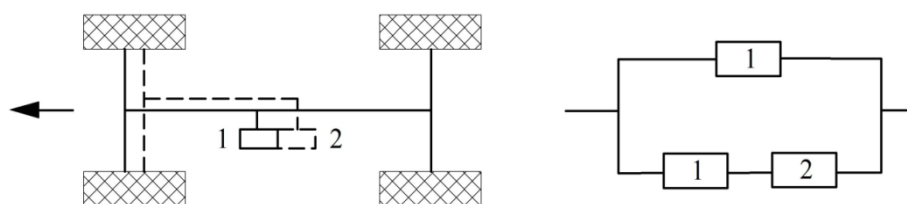


Рис. 3. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура

Вероятность безотказной работы тормозной системы, выполненной по такой схеме отдельного резервирования, определяются из выражения:

$$P(t) = [1 - (1 - P_1)^2] P_2 = 0,891.$$

Более надежной является схема отдельного резервирования, в которой работоспособным всегда остается один из контуров, объединяющий цилиндры двух передних и одного заднего колес, т.е. в процессе торможения участвуют три тормозных механизма (рис.4).

Вероятность безотказной работы тормозной системы с таким видом резервирования составляет:

$$P(t) = 1 - (1 - P_1)(1 - P_1P_2) = 0,981.$$

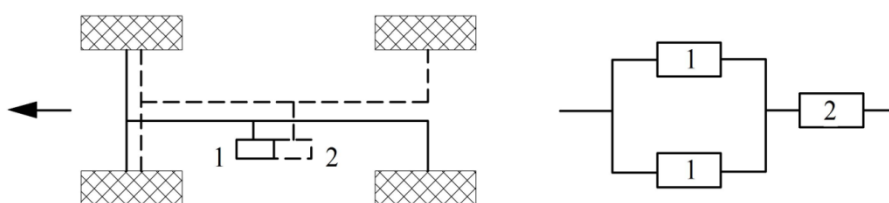


Рис. 4. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура и одного из цилиндров задних колес

На рис. 5. показана схема тормозной системы с общим резервированием, в которой любой из контуров осуществляет торможение всех колес, поэтому отказ одного из них не снижает тормозные качества автомобиля. В этом случае

$$P(t) = 1 - (1 - P_1P_2)^2 = 0,964$$

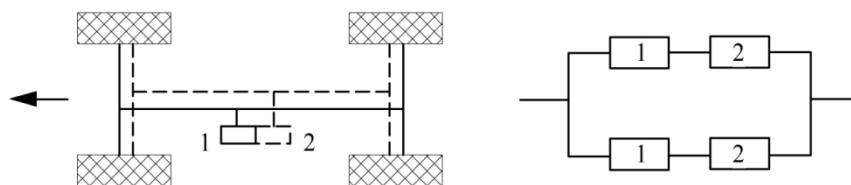


Рис. 5. Схема тормозной системы с общим резервированием

В любой схеме резервирования тормозной системы обязательным является наличие двух независимых главных тормозных цилиндров. Как правило, конструктивно они расположены последовательно в одном корпусе с приводом от педали одним штоком.

Оценка надежности тормозных систем

Тормозные системы современных автомобилей являются достаточно сложными и многоэлементными. Надежность этих систем зависит от способа включения элементов и надежности каждого из них. На рис.6. показаны двухконтурные тормозные системы автомобилей с гидравлическим приводом.

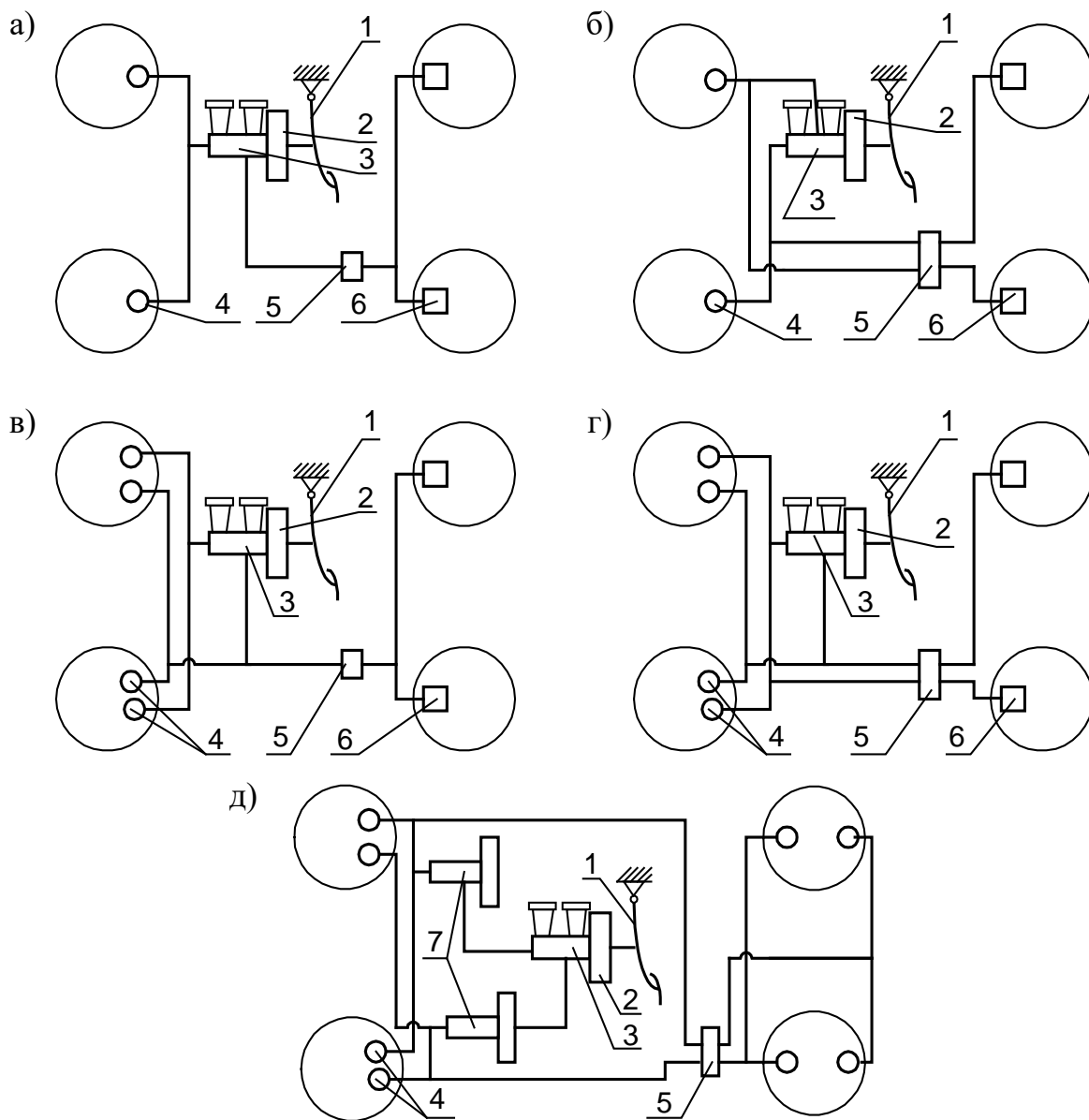


Рис.6. Двухконтурные тормозные системы автомобилей (гидравлический тормозной привод): а – двухконтурная система с разделением по осям; б – двухконтурная диагональная система; в – система с резервной подсистемой; г – с резервной системой; д – с полным дублированием. Обозначения: 1 – тормозная педаль; 2 – вакуумный усилитель; 3 – главный тормозной цилиндр; 4 – дисковый тормозной механизм; 5 – регулятор тормозных сил; 6 – барабанные тормозные механизмы; 7 – дополнительный усилитель

Схема а). Резервирование подсистем конструкцией автомобиля не предусмотрено. Усилие от педали 1 передается вакуумному усилителю 2, объединенному с главным тормозным цилиндром 3. В усилителе предусмотрена механическая связь педали с главным тормозным цилиндром. Главный тормозной цилиндр состоит из двух секций с автономным питанием тормозной жидкостью. Передняя секция питает контур тормозов задних колес, задняя секция – передних колес. Регулятор тормозных сил 5, включенный в контур задних тормозов, обеспечивает уменьшение тормозных сил на задних колесах при низких значениях вертикальных реакций на них. Такое конструктивное решение снижает опасность первоочередного блокирования задних колес и улучшает устойчивость автомобиля при торможении.

Схема б). Схема тормозной системы автомобиля в отличие от схемы а) состоит в диагональном включении тормозных механизмов в контуры: передняя секция питает контур переднего правого и заднего левого тормозных механизмов, а задняя – контур переднего левого и заднего правого тормозных механизмов. Регулятор тормозных сил 5 имеет две секции, каждая из которых управляет своим тормозным механизмом. Такая схема обладает большей эффективностью торможения в случае выхода из строя одного из контуров, чем схема а).

Схема в). Двухконтурная тормозная система с резервированием. Основная подсистема включает тормозные механизмы всех колес, а дополнительная резервная действует только на передние колеса с дисковыми тормозами 4. Последние являются составной частью тормозного механизма как основной системы, так и дополнительной резервной. Рабочие тормозные цилиндры отдельные. Регулятор тормозных сил 5 включен в основную подсистему.

Схема г). Тормозная система также двухконтурная с резервированием. Обе подсистемы по своей эффективности равнозначны. В каждую из них входит секция главного тормозного цилиндра 3, по одному рабочему цилиндру в обоих передних тормозных механизмах, секция регулятора тормозных сил и один тормозной механизм задних колес.

Схема д). Тормозная система зарезервирована в наибольшей степени. Параллельно подсистемам передних и задних тормозов включены такие же, поэтому деление подсистем на основные и резервные теряет смысл. Конструктивно это обеспечивается тем, что тормозные механизмы всех колес дисковые. Резервированы и усилители – помимо основного в каждой

подсистеме имеются дополнительные усилители 7. Основное преимущество этой схемы состоит в том, что отказ любого элемента тормозной системы не отражается на тормозных свойствах автомобиля.

Выполнение работы

Для предложенной преподавателем принципиальной схемы тормозной системы автомобиля составить структурную схему и рассчитать показатели надежности. Вероятность безотказной работы каждого из элементов тормозной системы принять одинаковой ($P_i = 0,99$).

Продолжительность работы 4 часа.

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- методы резервирования технических систем;
- принципиальная и структурная схемы тормозной системы;
- результаты вычислений надежности тормозной системы.

Контрольные вопросы

1. Последовательное и параллельное соединение элементов в технических системах.
2. С какой целью используют резервирование элементов и систем автомобилей?
3. Основные схемы резервирования тормозных систем автомобиля.

Библиографический список

1. Баженов Ю.В. Основы теории надежности машин : учеб. пособие / Ю.В.Баженов. – М.: Форум, 2014. – 320 с.
2. Болдин А.П. Основы научных исследований : учебник / А.П.Болдин, В.А.Максимов. – М. : ИЦ «Академия», 2012. – 336 с.
3. ГОСТ 27002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 38с.
4. Денисов А.С. Обеспечение надежности автотракторных двигателей / А.С.Денисов, А.Т.Кулаков. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2007. – 422 с.

5. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем: учебник для вузов / В.А.Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
6. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении / А.И.Кубарев. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.
7. Кузьмин Н.А. Техническая эксплуатация автомобилей: закономерности изменения работоспособности: учеб. пособие / Н.А.Кузьмин. – М.: ФОРУМ, 2011.–208с.
8. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. РД 50-690-89. – Изд-во стандартов, 1990. – 132 с.
9. Мирошников Л.В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях / Л.В.Мирошников, А.П.Болдин, В.И.Пал. – М.: Транспорт, 1977. – 263 с.
10. Озорнин С.П. Основы работоспособности технических систем: учеб. пособие / С.П.Озорнин. – Чита: Изд. ЧитГУ, 2006. – 123 с.
11. Павлов Е.В. Надёжность строительных и дорожных машин: учеб. пособие / Е.В.Павлов, А.Ф.Крюков. – Волгоград: Изд. ВолгГАСУ, 2005. – 134 с.
12. Проников А.С. Надежность машин / А.С.Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 532 с.
13. Сапронов Ю.Г. Экспертиза и диагностика объектов и систем сервиса: учеб. пособие / Ю.Г.Сапронов. – М.: ИЦ «Академия», 2008.–224 с.
14. Справочник. Надежность в машиностроении./ Под общ. ред. В.В. Шашкина и Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника , 1992. – 719 с.
15. Юркевич В.В. Надежность и диагностика технологических систем: учебник / В.В.Юркевич, А.Г.Схиртладзе. – М.: ИЦ «Академия», 2011. – 304 с.
16. Яхьяев Н.Я. Основы теории надёжности и диагностика: учебник / Н.Я.Яхьяев, А.В.Кораблин. – М.: ИЦ «Академия», 2009. – 256 с.

Оглавление

Работа № 1. ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТЬ МАШИН	3
Работа № 2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН	9
Работа № 3. ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ О ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ВЫБРАННОМУ ЗАКОНУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ	18

Работа № 4. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО ЗАКОНУ ВЕЙБУЛЛА	24
Работа № 5. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ	30
Работа № 6. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН	34