

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)**

**ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Методические указания к лабораторным работам и практиче-
ским 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

Основы надежности и работоспособности технических систем: Метод. указания к лаб. работам и практическим занятиям/ Владим. гос. ун-т имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; сост. Ю.В. Баженов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2015. – 86 с.

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

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 23.03.03 и 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» всех форм обучения.

Ил. 35 . Табл. 30 . Библиогр.: 16 назв.

УДК 629.113.004.58 (07)

ББК 39.3

ВВЕДЕНИЕ

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

Приоритетное значение надежности машин при их проектировании и изготовлении подтверждается статистическими данными, свидетельствующими о том, что расходы на поддержание их в работоспособном состоянии непрерывно растут. Суммарные ежегодные потери народного хозяйства, связанные с обслуживанием и ремонтом технических средств за период эксплуатации, в несколько раз превышают их первоначальную стоимость. Недостаточный уровень надежности машин существенно снижает их производительность из-за простоев в ремонте.

Решение проблемы повышения надежности автотранспортных средств требует, прежде всего, наличия достоверной, систематической информации по их отказам и неисправностям, фактическим ресурсам, расходам запасных частей, трудоемкостям обслуживания и ремонта, а также факторам, влияющим на эти показатели в реальных условиях эксплуатации. Обработка и анализ такой информации позволяют оценить уровень фактической надежности той или иной модели автомобиля, агрегата, системы, выявить слабые места в конструкции, разработать конкретные мероприятия по поддержанию автотранспортных средств в работоспособном состоянии.

В результате изучения дисциплины студент должен демонстрировать знания и умения по определению уровня надежности транспортных машин; выявлению закономерностей изменения параметров машин по наработке; обработке информации об отказах и неисправностях; определению нормативных значений диагностических параметров; оценке состояния машин методами диагностики (профессиональные компетенции ПК-5, ПК-8, ПК-9, ПК-15, ПК-16, ПК-31).

Работа № 1

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН И КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ИХ ОЦЕНКИ

Цель работы – изучить:

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

Общие сведения

Каждое техническое устройство, в том числе и автомобиль, характеризуется определенными выходными параметрами, т.е. величинами, определяющими показатели качества.

В соответствии с ГОСТ 15467-79 под **качеством** изделия понимается совокупность свойств, обуславливающих его пригодность для выполнения им своего функционального назначения. Применительно к автомобилям основными свойствами, характеризующими их качество, являются: надежность, безопасность, динамичность, производительность, топливная экономичность и др.

Каждое из этих свойств оценивается одним или несколькими выходными *параметрами*, которые в процессе эксплуатации принимают различные количественные значения, именуемые *показателями*. Таким образом, при анализе и оценке качества автомобилей последовательно рассматривается цепочка свойств, параметров и показателей, представленная на рис.1.

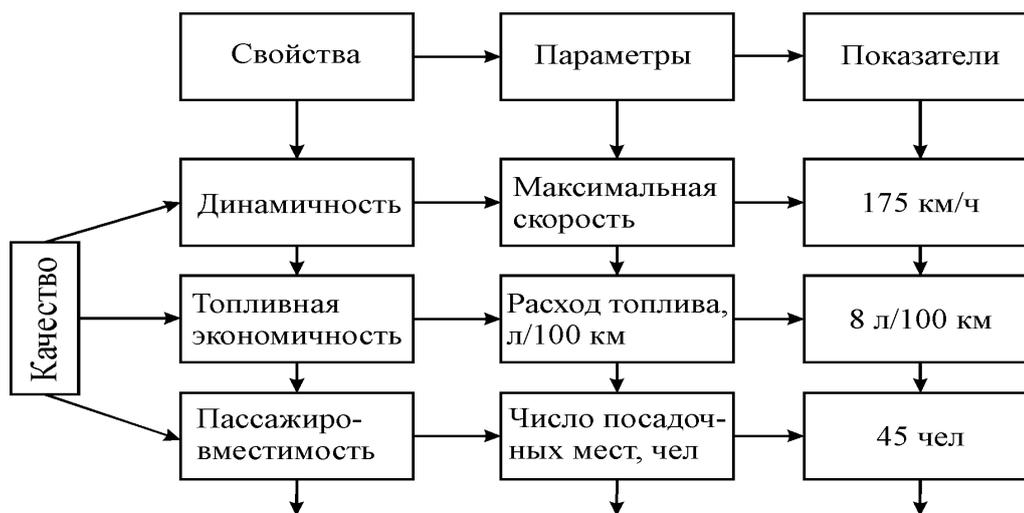


Рис.1.1. Структура понятия качества автомобиля

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. Другими словами, качественно изготовленный и грамотно эксплуатируемый автомобиль в течение всего ресурсного пробега должен выполнять транспортную работу без каких-либо простоев, кроме тех, которые необходимы для проведения в плановом порядке профилактических и ремонтных операций, обеспечивающих его работоспособное состояние.

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*.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Таким образом, долговечность анализирует работу объекта в течение всего периода эксплуатации.

Безотказность характеризует свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки

Ремонтпригодность – свойство объекта, определяющее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонта. Это свойство характеризует, с одной стороны качество конструкторских решений по предупреждению и обнаружению возможных отказов и, с другой, какой ценой по трудозатратам обеспечивается требуемый уровень надёжности изделия.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение и после срока хранения и (или) транспортирования.

Классификация объектов и их состояний в эксплуатации

В процессе эксплуатации из-за накопления повреждений в конструктивных элементах автомобиля его техническое состояние ухудшается и автомобиль из исправного состояния переходит в неисправное, а затем и неработоспособное. Различают следующие пять основных видов технического состояния объекта: исправное; неисправное; работоспособное; неработоспособное; предельное.

Исправное состояние – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Поддержание исправного состояния объекта безусловно требует определённых эксплуатационных затрат на выполне-

ние предусмотренных работ по техническому обслуживанию и ремонту, включая контроль и диагностику.

Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической или конструкторской документации, называется **неисправным состоянием** (неисправностью). Переход объекта из исправного состояния в неисправное происходит вследствие какого-либо повреждения, при этом он может сохранять свою работоспособность.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором он удовлетворяет тем требованиям нормативно-технической или конструкторской документации, выполнение которых обеспечивает его нормальное использование по назначению.

Неработоспособным называется состояние, при котором объект не может выполнять свои функции вследствие возникновения отказа.

Предельным называется состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Совокупность фактических состояний изделий составляет так называемый **жизненный цикл**, протекающий во времени (или по наработке) и имеющий вполне определённые закономерности, изучаемые в теории надёжности.

Отказы технических систем и их классификация

В соответствии с ГОСТ 27.002–89 под **отказом** понимается полная или частичная потеря технической системой работоспособности. При наступлении отказа система не может выполнять заданные функции или параметры ее технического состояния выходят за допустимые пределы.

Причины, по которым объект теряет свою работоспособность можно разделить на две основные группы:

- из-за разрушения элементов (поломки, износы, пластические деформации, обрывы и замыкания электропроводки и т.п.);
- вследствие ухудшения качества функционирования (нарушения регулировок механизмов и систем, ослабление контактов и креплений под действием вибраций, нарушение герметичности соединений в гидравлических и пневматических системах и др.).

В отличие от отказа под **повреждением** понимается событие, заключающееся в нарушении объектом исправности при сохранении им работоспособного состояния. При эксплуатации машин несвоевременное выявление и устранение повреждений может привести к отказу. Например, развитие таких повреждений, как мелкие трещины, небольшие деформации, потерто-сти изоляции, нарушения регулировок в случае их несвоевременного устра-

нения приводят к нарушению функционирования, т.е. потере работоспособности.

Для предупреждения отказов необходимо знать причины их возникновения и проявления, закономерности изменения технического состояния объекта, а также влияние, которое они оказывают на его работоспособность. В табл.1.2 приведена классификация основных отказов автомобилей в зависимости от этих факторов.

Таблица 1. Классификация отказов

Классификационный признак	Вид отказа
Источник и причина возникновения	Конструктивный Производственный Эксплуатационный Деградационный
Характер изменения параметра технического состояния	Постепенный Внезапный
Наличие внешнего проявления	Явный Скрытый
Взаимосвязь между отказами	Зависимый Независимый

Комплексные показатели надежности

Показатели надёжности количественно характеризуют, в какой степени конкретному изделию присущи определённые свойства, обуславливающие его надёжность. Они могут иметь размерность (например, наработка на отказ в тыс. км.) или не иметь её (вероятность безотказной работы, коэффициент технического использования и т.д.).

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 для оценки надёжности применяются количественные показатели, оценивающие её отдельные свойства (безотказность, долговечность и др.), так и *комплексные показатели*, характеризующие готовность и эффективность использования изделий.

В качестве комплексных показателей, оценивающих несколько свойств надёжности одновременно относятся коэффициенты готовности и технического использования.

Коэффициент готовности K_{Γ} – это вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени в периодах между плановыми профилактическими мероприятиями:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum t_{\text{pc}}}{\sum t_{\text{э}}} = \frac{\sum t_{\text{pc}}}{\sum t_{\text{pc}} + \sum t_{\text{p}}} \quad (1)$$

где $\sum t_{\text{э}}$ – суммарное время эксплуатации изделия в интервале наработки между плановыми ТО; $\sum t_{\text{рс}}$; $\sum t_{\text{р}}$ – суммарное время пребывания изделия в работоспособном состоянии и ремонте за этот же период.

Коэффициент $K_{\text{Г}}$ оценивает непредусмотренные остановки объекта на устранение отказов в периоды между техническими обслуживаниями, которые свидетельствуют о том, что профилактические операции ТО не в полной мере выполняют свою роль.

Коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$ представляет собой 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:

$$K_{\text{ти}} = \frac{\sum t_{\text{рс}}}{\sum t_{\text{рс}} + \sum t_{\text{р}} + \sum t_{\text{то}}}, \quad (1.2)$$

где $\sum t_{\text{то}}$ – суммарное время нахождения объекта в техническом обслуживании.

Таким образом, коэффициент технического использования представляет собой вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени на заданной наработке, а не только в периоды между ТО.

Выполнение работы

После изучения указаний студент получает *персональные данные* по суммарному времени нахождения автомобиля в работоспособном и неработоспособном состоянии и выполняет необходимые расчеты.

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

Продолжительность работы – 2 часа.

Задание. По заданным персональным данным рассчитать комплексные показатели надежности.

Пример. Определить комплексные показатели надежности двигателя по результатам эксплуатационных наблюдений за его работой в течение 1-го года (табл.2).

Таблица 2. Статистические данные о времени нахождения двигателя в эксплуатации, ТО и ремонте

№ ТО	Периодичность ТО, тыс. км	$\sum t_{э}$, час	$\sum t_{рс}$, час	$\sum t_{р}$, час	$\sum t_{то}$, час
ТО-1	16	380	371	9	11
ТО-2	16	380	373	7	11
ТО-3	16	380	368	12	11
ТО-4	16	380	372	8	11
ТО-5	16	380	369	11	11
	Итого: 80	1900	1853	47	55

Используя данные таблицы 2, определяем:

- коэффициент готовности

$$K_r = \frac{1853}{1853+47} = 0,975;$$

- коэффициент технического использования

$$K_{ти} = \frac{1853}{1853+47+55} = 0,948.$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- определения надежности и ее основных свойств;
- результаты расчета комплексных показателей надежности;
- заключение и выводы.

Контрольные вопросы

1. Раскройте понятия качества, надежности и работоспособности машин.
2. Приведите классификацию отказов.
3. Какими свойствами характеризуется надежность изделий?

Работа № 2

ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Цель работы – изучить:

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

Общие сведения

Под долговечностью автомобиля понимается его свойство сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Таким образом, долговечность автомобиля анализирует его работу за весь период эксплуатации и учитывает, что длительная работа невозможна без проведения необходимых для поддержания объекта в технически исправном состоянии ремонтных и профилактических мероприятий.

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.

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

Таким образом, понятие «ресурс» применяется при характеристике долговечности по наработке изделия, а «срок службы» - по календарному времени. Как ресурс, так и срок службы изделий зависят от большого числа факторов, обусловленных погрешностями их производства и условиями эксплуатации. В связи с этим и ресурс, и срок службы являются случайными величинами.

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.

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, рассекает 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.

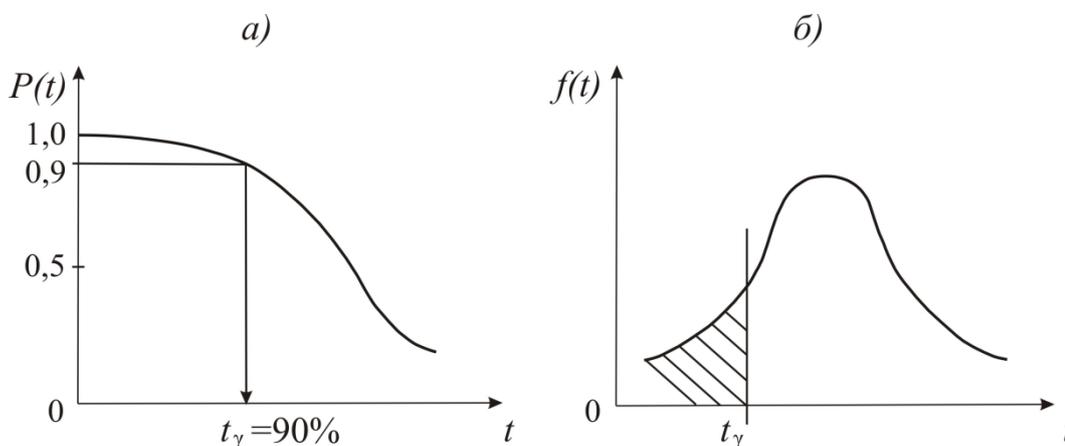


Рис. 1. Схема определения γ – процентного ресурса

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

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

Выполнение работы

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

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

Продолжительность работы 4 часа.

Задание. По выданному преподавателем вариационному ряду рассчитать показатели долговечности.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за долговечностью 46- и 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
Средины 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 $t_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i m_i = 201,304$ 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 $\nu = \frac{\sigma(t)}{t_{cp}} = 0,17$

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.

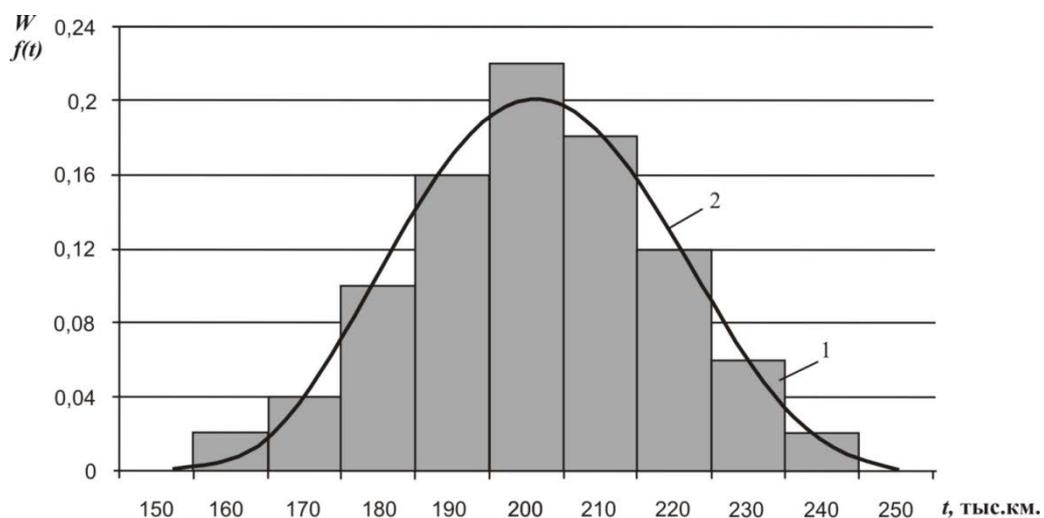


Рис. 2. Гистограмма 1 и дифференциальная функция распределения 2 ресурса двигателей

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 долговечности;

- гистограмму, дифференциальную и интегральную функции распределения ресурса;
- заключение и выводы по долговечности исследуемого изделия.

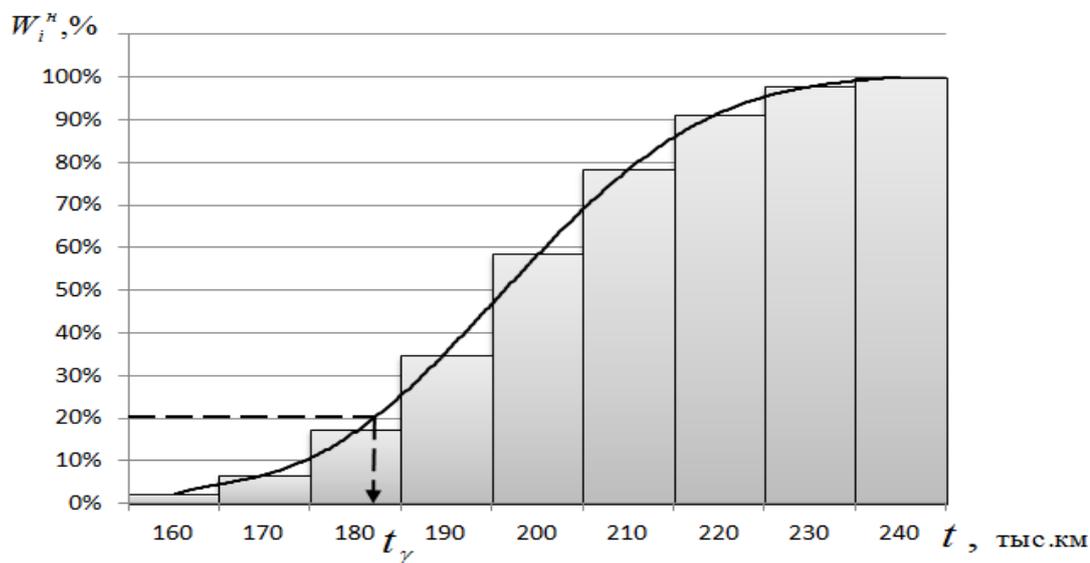


Рис. 3. Интегральная функция распределения ресурса двигателей по наработке

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?

Работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ АГРЕГАТОВ И СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Цель работы – изучить:

- основные показатели для оценки безотказности машин;
- методику определения основных показателей безотказности.

Общие сведения

Безотказность наряду с долговечностью является важнейшим свойством надежности и определяет непрерывную работу объекта без каких-

либо вмешательств, направленных на поддержания его работоспособности, т.е. технических обслуживаний и ремонтов. 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.

Значение вероятности безотказной работы $P(t)$, как и всякой вероятности, находится в пределах

$$0 \leq P(t) \leq 1.$$

С увеличением наработки объекта вероятность его безотказной работы уменьшается и, соответственно, увеличивается вероятность отказа (рис. 1).

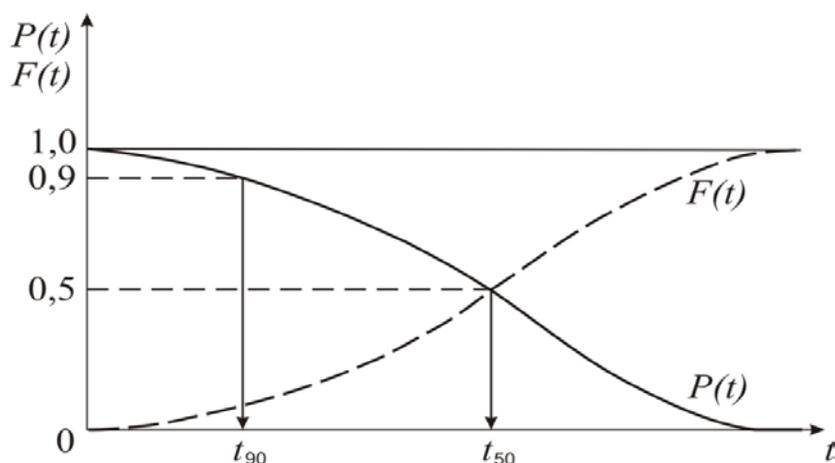


Рис. 1. Изменение вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$ по наработке

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $F(t)$ образуют полную группу событий:

$$P(t) + F(t) = 1$$

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 :

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

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

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{T}{n}, \quad (2)$$

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

$$\bar{t} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_r t_r}{m_1 + m_2 + \dots + m_r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r m_j t_j, \quad (3)$$

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

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j, \quad (4)$$

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:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (5)$$

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

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{m(t + \Delta t) - m(t)\}}{\Delta t}, \quad (6)$$

где Δt – малый интервал наработки; $m(t)$ – число отказов, наступивших до достижения наработки t ; $m(t + \Delta t) - m(t)$ – число отказов на интервале Δt .

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

$$\bar{\omega} = \frac{m(t_2) - m(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (7)$$

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 практических указаний каждый студент получает *персональные статистические данные* результатов эксплуатационных испытаний по надежности агрегатов, узлов и систем автомобиля и выполняет расчеты показателей безотказности.

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

Продолжительность работы 4 часа.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за долговечностью свечей зажигания установлены их наработки до отказа в тыс. км (табл.1)

Таблица 1. 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. 1 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. 2.

Таблица 2. Параметры интервалов наработок свечей зажигания

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

Таблица 3. 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;
- 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 безотказностью машин и какими показателями оценивается это свойство надежности?

Работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПАРКА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Цель работы – изучить:

- показатели, используемые для оценки надежности парка автотранспортных средств;
- методику оценки надежности парка автомобилей по вероятностным характеристикам его функционирования.

Общие сведения

Под **надежностью автомобильного парка (АП)** понимается его свойство выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих определенным условиям использования.

На работу АП и его надежность оказывает влияние большое число факторов: *технических* (надежность автомобилей и их возраст, количество и качество запасных частей и эксплуатационных материалов, обеспеченность и состояние гаражного оборудования и др.); *технологических* (периодичность и качество выполнения ТО и ремонта, соответствие числа постов ТО и ТР потребностям и т.п.); *организационных* (система снабжения запасными частями и агрегатами, простои по различным причинам и др.); *социальных* (обеспеченность кадрами и их текучесть, квалификация и стаж работы водителей и ремонтных рабочих, условия и организация труда, стимулирование персонала и т.д.); *дорожных и природно-климатических* (состояние и обустройство дорог, температура, влажность, запыленность воздуха и др.). Совокупное действие перечисленных факторов приводит к тому, что надежность одного автомобиля не совпадает с надежностью всего парка машин.

Между надежностью отдельно взятого автомобиля и надежностью АП имеются существенные различия.

1. Автомобиль является изделием, обладающим конечным ресурсом, в то время как АП – это непрерывно обновляемая система за счет замены выработавших свой ресурс автомобилей новыми.

2. Элементы автомобиля (агрегаты, узлы и детали) обычно связаны между собой так, что отказ одного из них может привести к отказу автомобиля в целом; в парке автомобиля функционируют независимо один от другого.

3. АП в отличие от автомобиля не имеет полных отказов; то или иное количество автомобилей всегда выпускается на линию.

4. Возможности для резервирования автомобиля или парка автомобилей разные: в первом случае резервирование элементов может потребовать глубокого вмешательства в конструкцию, во втором замена или резервирование целых автомобилей осуществляются значительно проще.

5. Экономические возможности и последствия замены элементов автомобиля и элементов парка (т.е. целых автомобилей) разные; своевременное списание автомобилей, выработавших свой ресурс, способствует улучшению показателей эффективности работы парка.

6. Ограниченный простой отдельно взятого автомобиля практически не сказывается на его надежности, в то время как для АП простой даже работоспособного автомобиля рассматривается как частичный отказ.

Надежность среднесписочного автомобиля с достаточной степенью точности характеризует *коэффициент технической готовности* α_m (относительное число работоспособных автомобилей):

$$\alpha_T = \frac{D_{\text{Э}}}{D_{\text{Э}} + D_{\text{Р}}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{Э}}$, $D_{\text{Р}}$ – суммарные дни пребывания автомобиля на линии (в эксплуатации) и в ТО и ремонте.

Для парка подвижного состава коэффициент технической готовности α_T представляет собой отношение количества автомобиле-дней пребывания автомобилей в эксплуатации $AD_{\text{Э}}$ к суммарному количеству календарных автомобиле-дней $AD_{\text{И}}$ (автомобиле-дней в эксплуатации и автомобиле-дней в ТО и ремонте):

$$\alpha_T = \frac{AD_{\text{Э}}}{AD_{\text{И}}} = \frac{AD_{\text{Э}}}{AD_{\text{Э}} + AD_{\text{Р}}}. \quad (2)$$

Обобщенной оценкой степени использования парка автомобилей за период $D_{\text{И}}$ служит коэффициент выпуска подвижного состава на линию $\alpha_{\text{В}}$ (относительное число автомобилей, направленных заказчику):

$$\alpha_{\text{В}} = \frac{AD_{\text{Э}}}{AD_{\text{Э}} + AD_{\text{Р}} + AD_{\text{Н}}}, \quad (3)$$

где $AD_{\text{Н}}$ – число автомобиле-дней нормированных простоев, а также простоев из – за отсутствия работы, персонала и др.

Разница между α_T и $\alpha_{\text{В}}$ обусловлена преимущественно простоями автомобилей по организационно-техническим и организационным причинам.

Моделирование процессов функционирования АП и его надежности

В соответствии с «Положением о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта» автомобиль в парке может находиться в одном из следующих технологических состояний:

- работоспособном (на линии);
- простое в техническом обслуживании (ТО-1 или ТО-2);
- простое в текущем ремонте (ТР);
- ожидании списания после выработки нормативного ресурса.

В реальных условиях эксплуатации в зависимости от организационно-технических и других факторов технологические состояния автомобиля более разнообразны. С точки зрения надежности АП их можно разбить на линейные, когда автомобиль работоспособен и выполняет свои функции, и нелинейные, когда автомобиль неработоспособен или работоспособен, но по

различным организационно-техническим или организационным причинам на линию не поступает.

Простои по организационно - техническим причинам могут быть вызваны необходимостью проведения различных технических воздействий (ТО-2 или ТР), подготовкой нового автомобиля к эксплуатации, простоями автомобилей после ДТП и т.д.

Простои по организационным причинам связаны с отсутствием заказчика транспортных услуг, водителей, ремонтных рабочих, из-за некомплектованности штатов, болезней, отпусков и др.

При анализе надежности АП удобно использовать граф возможных состояний автомобилей, который учитывает принятую в конкретном АТП систему эксплуатации. Один из возможных вариантов обобщенного графа состояний автомобилей представлен на рис. 1. В соответствии с графиком производственного процесса автомобиля, помимо работы на линии (состояние S_1), проходят общее Д-1 и углубленное Д-2 диагностирование (состояния S_3 и S_4), плановые ТО-1 и ТО-2 (состояния S_5 и S_7), текущий ремонт (состояние S_6). В случае занятости постов ТО, ремонта или диагностирования автомобиля простаивают в ожидании соответствующих технических воздействий (состояние S_2), а исправные автомобили направляются в зону хранения (состояние S_8).

Переходы автомобилей из одних состояний в другие многообразны и отображаются на графе стрелками, соединяющими эти состояния. Например, автомобиль, работающий на линии (состояние S_1), может перейти в любое из семи возможных состояний графа. Из состояния S_6 (зона ТР) он может перейти в состояние S_3 , S_4 или S_8 . Стрелка N_1 указывает на убытие автомобилей из АП, вызванное их списанием или продажей, а N_2 - поступление вновь приобретенных автомобилей.

Для оценки надежности АП необходимо, прежде всего, установить численность автомобилей в каждом из состояний и вероятности нахождения в них. Такие задачи решаются различными методами: статистического анализа, теории массового обслуживания, имитационного моделирования и др. Наиболее точную и достоверную оценку позволяет получить метод статистического анализа, так как он основан на базе существующей системы учета и оценок работы парка конкретного автотранспортного предприятия.

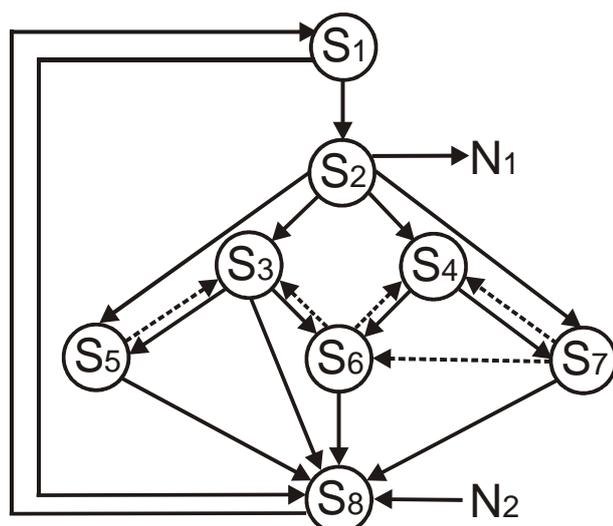


Рис. 1. Обобщенный граф возможных состояний автомобилей

Оценка показателей надежности АП по статистическим данным

В реальных условиях эксплуатации автопарка число автомобилей и продолжительность их пребывания в том или ином состоянии - величины случайные, зависящие от многих факторов. Однако, используя статистические данные результатов работы автотранспортного предприятия за определенный период времени, можно установить закономерности распределения этих случайных величин и характеристики надежности АП. Для этого методами математической статистики и теории вероятностей осуществляют переход от статистических характеристик к теоретическим.

Рассмотрим метод статистического анализа показателей надежности АП на примере.

Выполнение работы

После изучения практических указаний каждый студент получает *персональные статистические данные* результатов эксплуатационных наблюдений по состоянию автомобилей в парке и выполняет расчеты показателей надежности.

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

Продолжительность работы 2 часа.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за техническим состоянием автомобилей конкретного АТП в течение полугода были получены следующие статистические данные об их нахождении в различном технологическом состоянии (табл.1).

Таблица 1. Статистические данные работы АП

Списочное количество автомобилей, $N_{СП}$	Кол-во автомобилей на линии, $N_{Л}$	Простои автомобилей			
		ТО	ТР	ОТП	ОП
348	283	4	42	6	13
352	285	8	40	10	9
352	290	7	28	9	18
351	271	3	59	8	10
352	275	8	48	9	12
352	278	7	49	8	10
354	285	0	52	9	8
354	285	5	49	9	6
354	289	5	46	9	5
354	279	5	53	10	7
354	283	3	53	7	8
354	286	6	47	7	8
354	289	4	43	7	11
354	289	2	44	6	13
354	279	1	52	8	14
354	289	4	48	7	6

На основе данных табл. 1 о списочном количестве автомобилей, выпуске на линию, простоях по различным причинам построим граф состояний автомобиля (рис. 2).

Граф включает в себя следующие состояния: работу на линии – Л, простои в техническом обслуживании – ТО, простои в текущем ремонте – ТР, простои по организационно - техническим причинам – ОТП, простои по организационным причинам – ОП.

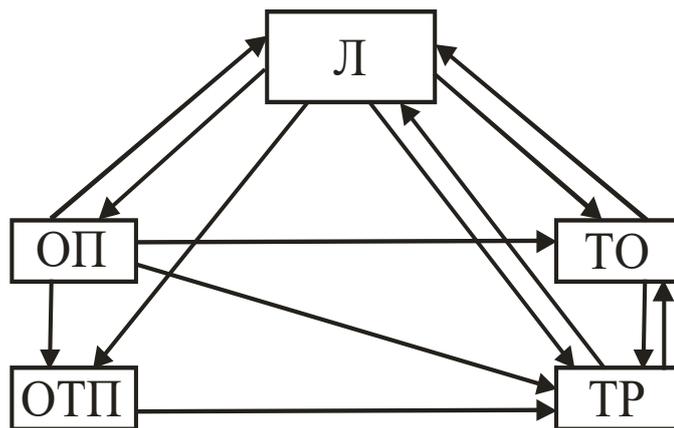


Рис. 2. Граф состояний автомобилей в АТП

Обобщенной характеристикой работы АП является вероятность пребывания автомобилей на линии. Для установившегося режима эксплуатации отношение математического ожидания числа автомобилей, соответствующего состоянию Л, к среднесписочному числу автомобилей в АТП, принимается равным коэффициенту выпуска автомобилей на линию α_B ; отношение суммы математических ожиданий автомобилей с состояниями Л и ОП к среднесписочному числу автомобилей – коэффициенту технической готовности α_T .

Результаты обработки статистических данных работы АП представлены в табл. 2.

Таблица 2. Числовые характеристики надежности АП

Характеристики надежности АП	Состояние				
	Работа на линии, \bar{N}_L	ТО	ТР	ОТП	ОП
1. Математическое ожидание количества автомобилей в \bar{N}_j в j -м состоянии	283,44	4,5	47,13	8,06	9,87
2. Относительная величина математического ожидания $\bar{R}_j = \bar{N}_j / \bar{N}_{СП}$	0,803	0,013	0,133	0,023	0,028
3. Среднеквадратическое отклонение σ_j	5,632	2,366	7,060	1,289	3,481
4. Коэффициент вариации v_j	0,019	0,525	0,149	0,159	0,352

Анализ показателей надежности АП показывает, что коэффициент выпуска автомобилей на линию достаточно высокий ($\alpha_B = R_L = 0,803$) и стабильный ($v = 0,019$). Коэффициент технической готовности, учитывающий работу автомобилей на линии и их простои по организационным причинам, составил

$$\alpha_T = \bar{R}_L + \bar{R}_{ОП} = 0,803 + 0,028 = 0,831.$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- основные показатели для оценки надежности автомобильного парка;

- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов показателей надежности автопарка;
- граф состояний автомобилей в АТП;
- заключение и выводы по надежности исследуемого автопарка.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под надежностью автопарка?
2. Приведите факторы, влияющие на надежность автомобильного парка.
3. Что характеризует граф состояний автомобилей в парке?;
4. Назовите основные показатели, характеризующие надежность автопарка.

Работа № 5

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ И СИСТЕМ 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.

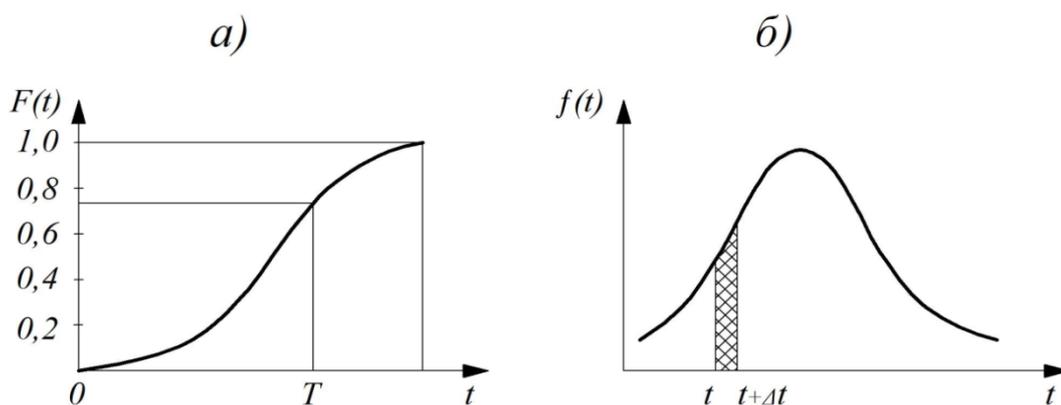


Рис.1. Графическая интерпретация интегральной (а) и дифференциальной (б) функций распределения случайной величины

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 .

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.

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 $R = t_{\text{max}} - t_{\text{min}} = 30,6 - 11,4 = 19,2$ 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
Середины 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).

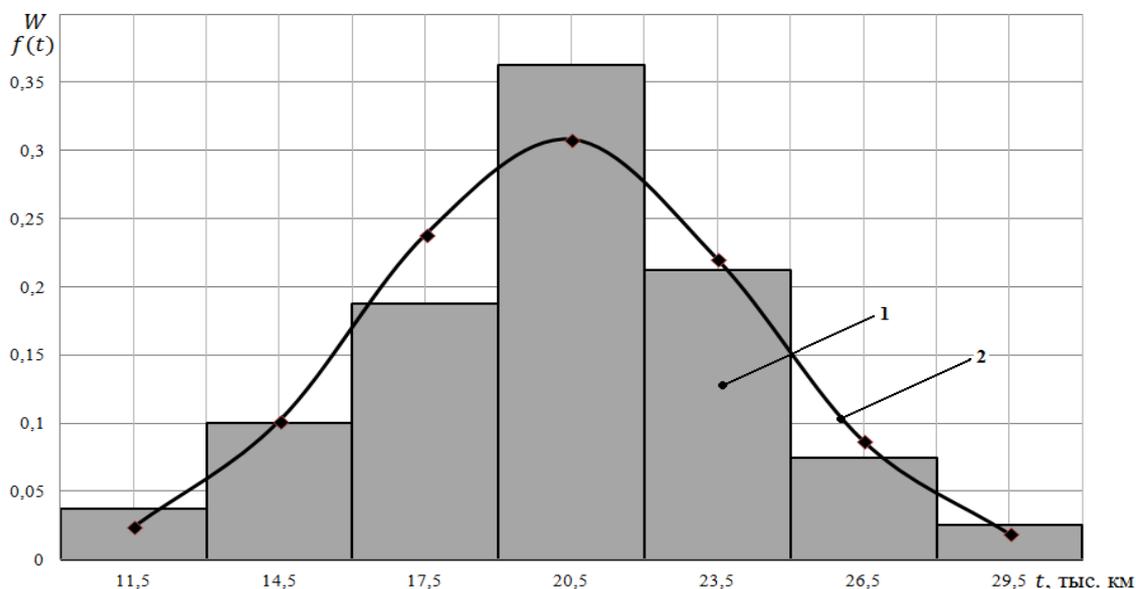


Рис. 2. Гистограмма 1 и теоретическая кривая распределения наработок до отказа шаровых пальцев рулевого управления автобусов ЛиАЗ – 5256

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

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).

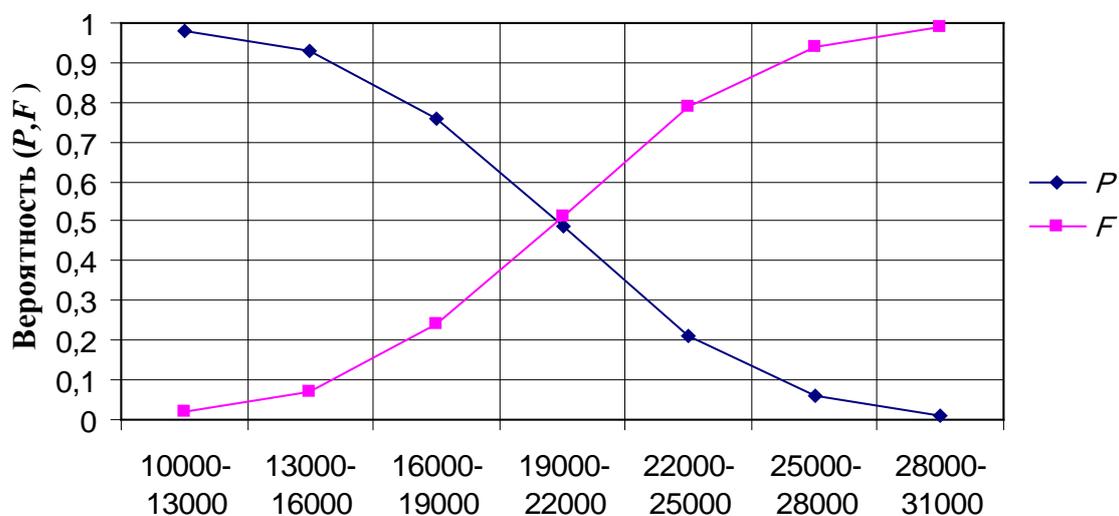


Рис. 3. Графики функций вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ шаровых пальцев рулевого управления

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?

Работа № 6

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ О ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ВЫБРАННОМУ ЗАКОНУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Цель работы – изучить:

- критерии согласия, служащие для проверки гипотезы о выбранном законе распределения;
- проверку принадлежности статистического распределения выбранному закону с помощью критерия согласия χ^2 Пирсона.

Общие сведения

При подборе теоретической кривой к полученной гистограмме (статистическим распределением) случайной величины между ними всегда имеются некоторые расхождения. Поэтому возникает задача проверки гипотезы о том, что исследуемая случайная величина подчиняется выбранному закону распределения, которая осуществляется с помощью соответствующих «критериев согласия». Для проверки правдоподобия гипотезы о принадлеж-

ности результатов испытаний по надежности автомобилей выбранному закону распределения чаще всего используется критерий χ^2 Пирсона

$$\chi_{\text{опыт.}}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}, \quad (1)$$

где \bar{m}_i , m_i – опытное и теоретическое число попаданий опытной случайной величины в i -й интервал; k – количество интервалов; α – уровень значимости; S – число степеней свободы.

Уровень значимости α представляет собой вероятность того, что величина $\chi_{\text{опыт.}}^2$ в результате случайных отклонений частот опытного распределения от соответствующих частот теоретического распределения, будет меньше табличного значения $\chi_{\text{табл.}}^2$.

Число степеней свободы определяется из выражения

$$S = k - r - 1, \quad (2)$$

где r – число параметров теоретического закона распределения.

Значения $\chi_{\text{табл.}}^2$ в зависимости от наиболее распространенных в инженерных задачах уровней значимости α и числа степеней свободы S приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения критерия χ^2 Пирсона

S	Уровень значимости α				S	Уровень значимости α			
	0,01	0,05	0,10	0,20		0,01	0,05	0,10	0,20
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 $\chi_{\text{опыт.}}^2$;
- 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:

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

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

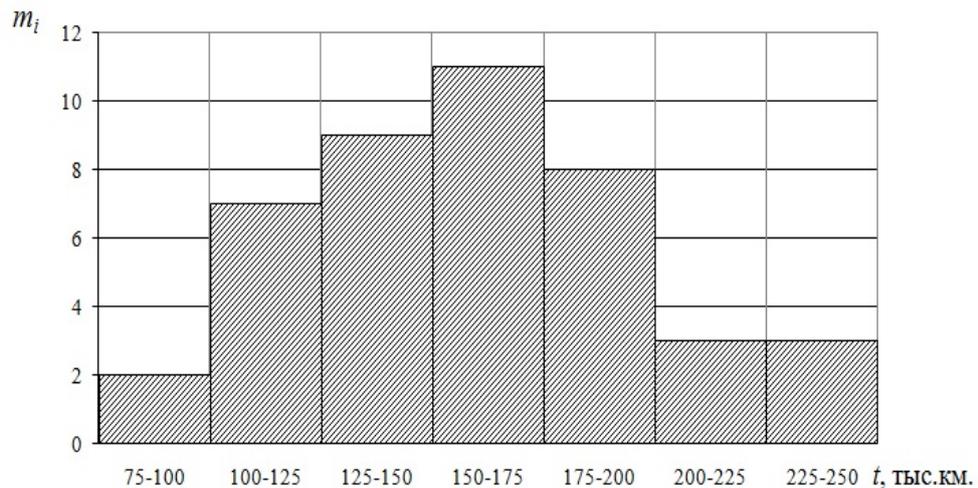


Рис.1. Гистограмма распределения отказов вкладышей коренных шеек коленчатого вала по наработке

Вид гистограммы и значение коэффициента вариации $\nu = 0,24$ 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,

$z = \frac{t - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma(t)}$ и вычисляем границы новых интервалов:

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

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	- ∞	-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	- ∞	-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				$\chi_{опыт.}^2 = 2,317$

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).

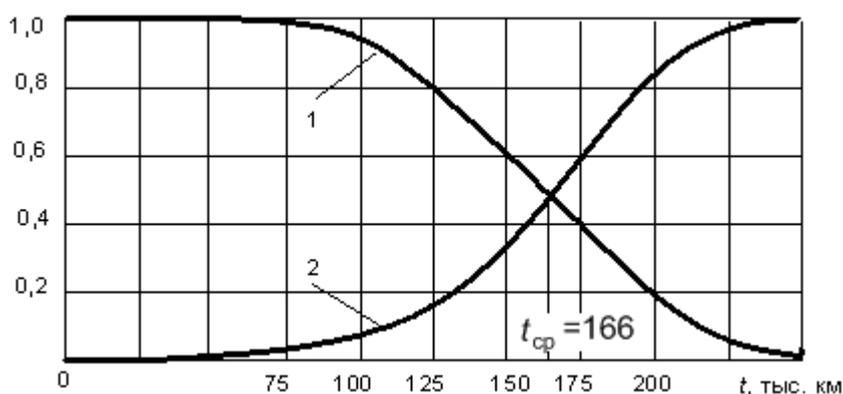


Рис. 2. График функции вероятности безотказной работы (1) и вероятности отказов (2) вкладышей шеек коленчатого вала

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 № 7

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМУ ЗАКОНУ

Цель работы – изучить:

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

Общие сведения

Непрерывная случайная величина t считается распределенной по экспоненциальному закону, если ее плотность вероятности определяется выражением:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ при } t \geq 0,$$

где λ – параметр закона распределения; e – основание натурального логарифма ($e = 2,7183$); t – случайная величина наработки.

При исследовании надежности машин параметр λ может выражать, например, интенсивность отказов, или интенсивность их восстановления.

В общем случае экспоненциальным распределением описываются события, которые возникают с постоянной интенсивностью ($\lambda = \text{const}$) и независимо друг от друга (наработки деталей с внезапным характером отказов, трудоемкости их устранения, интервалы времени между поступлениями автомобилей в зону ремонта и др.).

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $F(t)$ на интервале наработки от 0 до t вычисляются из выражений:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; F(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Средняя наработка до отказа (средний ресурс, средний срок службы, средний срок сохраняемости, среднее время восстановления отказа):

$$t_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Среднее квадратическое отклонение для экспоненциального закона распределения:

$$\sigma = t_{\text{cp}} = \frac{1}{\lambda}.$$

Коэффициент вариации:

$$\nu = \frac{\sigma}{t_{\text{cp}}} = 1.$$

Принадлежность опытных данных экспоненциальному закону в первом приближении принимается по виду гистограммы их распределения и значению коэффициента вариации ν , характеризующего рассеивание случайной величины относительно среднего значения. Экспоненциальному закону соответствует значение коэффициента вариации $\nu = 0,8 \dots 1,2$.

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.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за 41 средним грузоподъемности были получены следующие наработки до отказа элементов системы освещения в тыс. км (табл. 1).

Требуется установить закон распределения наработок, проверить гипотезу о принадлежности опытных данных выбранному закону, построить графики вероятностей безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$.

Таблица 1. Значения наработок до отказа элементов системы освещения

8,7; 14,0; 17,1; 72,7; 14,3; 9,9; 24,2; 26,6; 68,8; 40,1; 89,4; 17,7; 48,1; 14,6; 7,1; 6,0; 22,6; 12,4; 11,6; 18,8; 27,3; 4,4; 9,2; 79,6; 13,4; 19,2; 29,6; 34,2; 37,7; 16,8; 13,8; 2,1; 46,6; 38,0; 11,0; 8,1; 42,9; 42,2; 59,4; 50,9; 103,9

Все расчеты выполняем с использованием программы Excel.

1. Определяем параметры статистического ряда распределения:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 101,8$ тыс. км;
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \lg 35 \approx 7$;
- величина интервала $h = R/k = 101,8 / 7 \approx 15$ тыс. км;
- середины интервалов: $\bar{t}_1 = 7,5$; $\bar{t}_2 = 22,5$; $\bar{t}_3 = 37,5$; $\bar{t}_4 = 52,5$; $\bar{t}_5 = 67,5$; $\bar{t}_6 = 82,5$; $\bar{t}_7 = 97,5$ тыс. км;
- частоты попаданий наработок в эти интервалы: $\bar{m}_1 = 16$; $\bar{m}_2 = 10$; $\bar{m}_3 = 6$; $\bar{m}_4 = 4$; $\bar{m}_5 = 2$; $\bar{m}_6 = 2$; $\bar{m}_7 = 1$.

2. Находим числовые характеристики распределения наработок:

- среднее значение наработки до отказа $t_{\text{CP}} = 28,9$ тыс. км;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma = 23,0$ тыс. км;
- коэффициент вариации $v = 0,80$.

3. Строим гистограмму распределения опытных частот \bar{m}_i (рис. 1) и по ее виду, а также значению коэффициента вариации $v = 0,80$ предполагаем, что распределение наработок до отказа подчиняется экспоненциальному закону.

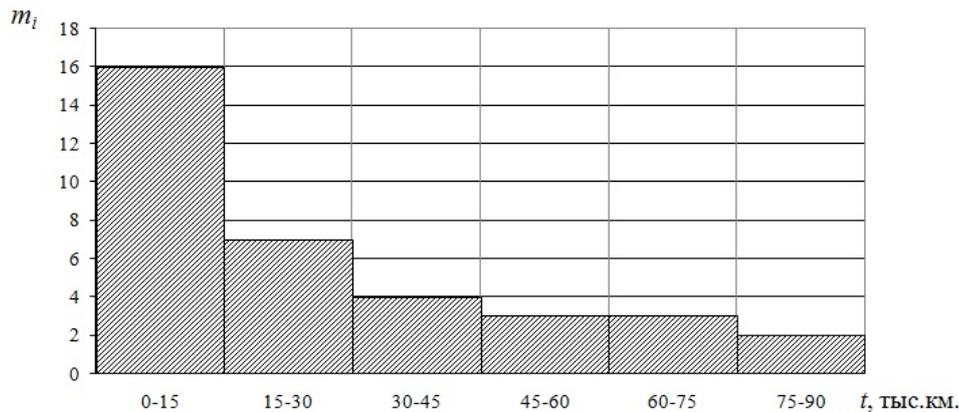


Рис.1. Гистограмма распределения наработок элементов системы освещения до отказа

4. Определяем нормирующий множитель

$$C = 1 / \sum_{i=1}^7 p_i = 1 / 0,977 = 1,024$$

5. Рассчитываем исправленные вероятности $p_i = p_{iy} C$:

$$p_1 = 0,419; \quad p_2 = 0,247; \quad p_3 = 0,146; \quad p_4 = 0,090; \quad p_5 = 0,053; \quad p_6 = 0,027; \\ p_7 = 0,018 .$$

6. Определяем теоретические частоты $m_i = p_i N$:

$$m_1 = 17,179; \quad m_2 = 9,881; \quad m_3 = 5,863; \quad m_4 = 3,608; \quad m_5 = 2,132; \quad m_6 = 1,066; \\ m_7 = 0,738.$$

7. По опытным данным находим значение критерия согласия χ^2 Пирсона (табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчета критерия согласия χ^2 Пирсона

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	16	17,179	- 1,179	1,390	0,0809
2-й	10	9,881	0,119	0,014	0,0142
3-й	6	5,863	0,137	1,019	0,1729
4-й	4	3,608	0,392	0,154	0,0427
5-й	2	2,132	- 0,132	0,017	0,0080
6-й	2	1,066	0,934	0,872	0,8180
7-й	1	0,738	0,262	0,069	0,0935
Σ	41				$\chi^2_{\text{опыт}} = 1,230$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $S = k - r - 1 = 7 - 1 - 1 = 5$ табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 11,1$. Так как $\chi^2_{\text{опыт}} < \chi^2_{\text{табл}}$, гипотеза о распределении наработок элементов системы освещения по экспоненциальному закону не отвергается.

8. Определяем значения интегральных функций распределения отказов $F(t)$ и вероятностей безотказной работы $P(t)$ по интервалам наработки (табл. 3).

Таблица 3. Результаты расчета функций распределения $F(t)$ и $P(t)$

Функция	Интервал						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
$F(t_i)$	0,419	0,666	0,812	0,902	0,955	0,982	1,0
$P(t_i)$	0,581	0,334	0,188	0,098	0,045	0,018	0

9. Используя найденные по интервалам наработки значения $F(t_i)$ и $P(t_i)$, строим графики интегральных функций распределения отказов и вероятности безотказной работы (рис. 2).

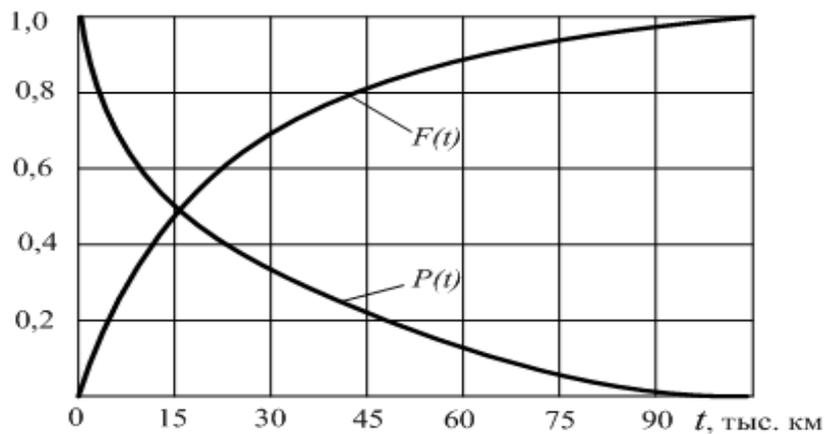


Рис.2. Гистограмма распределения наработок элементов системы освещения до отказа

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 $P(t_i)$ и отказов $F(t_i)$;
- проверку гипотезы о принадлежности опытных данных экспоненциальному закону распределения по критерию согласия χ^2 Пирсона.

Контрольные вопросы

1. Для описания каких отказов используется экспоненциальное распределение?
2. Постройте графики интегральной функции распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работ $P(t)$ для экспоненциального закона распределения.
3. Как проверяется гипотеза о принадлежности опытных данных выбранному распределению с помощью критерия согласия χ^2 ?

Работа № 8

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:

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

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.

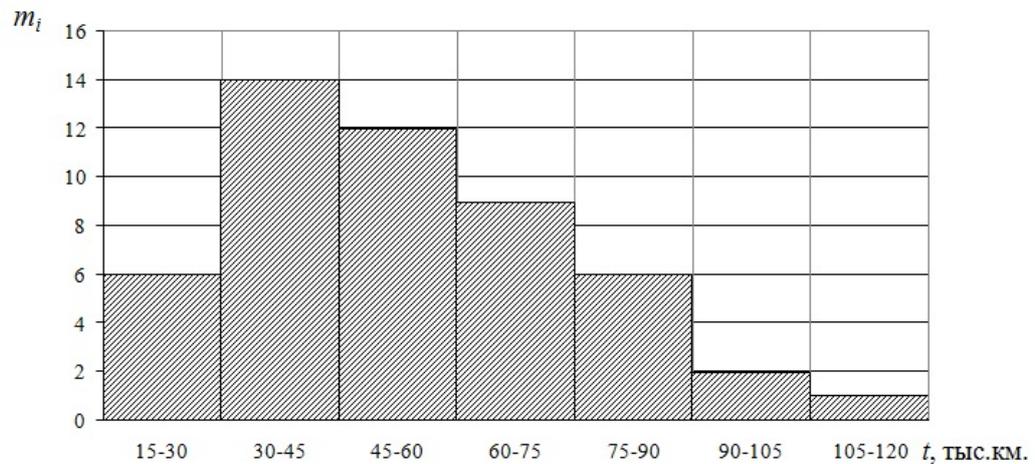


Рис.1. Гистограмма распределения отказов ведомых дисков сцепления автомобилей

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

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

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

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

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

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.

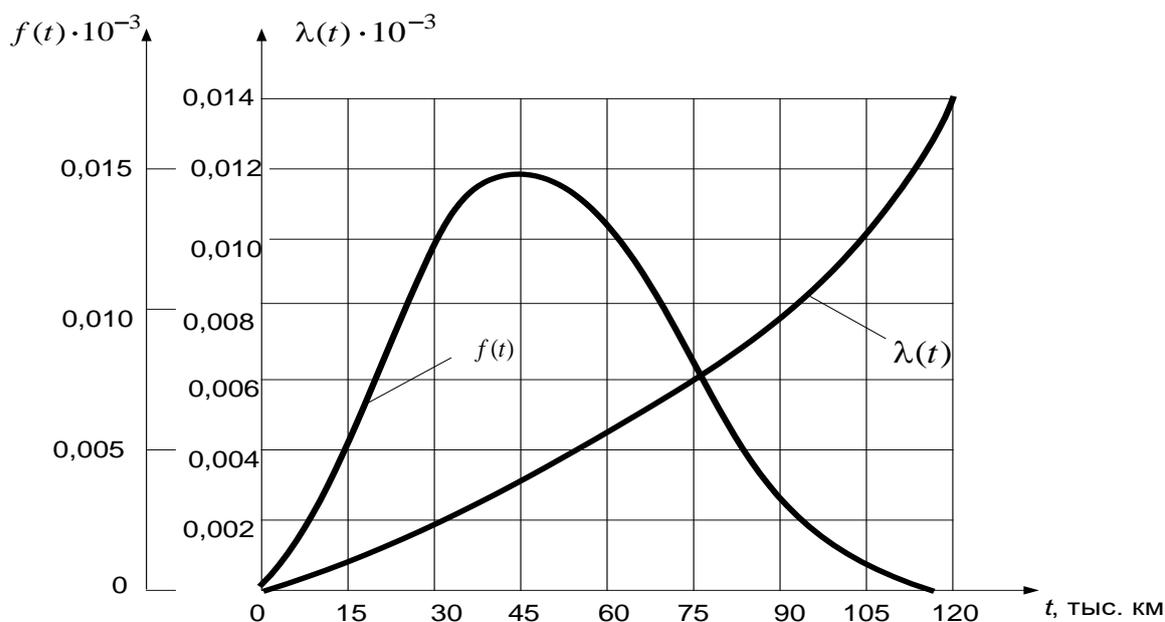


Рис.2. Графики плотности распределения $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ ведомых дисков сцепления

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 $P(t_i)$ и отказов $F(t_i)$;
- 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 № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ МАШИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НЕЗАВЕРШЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Цель работы – изучить:

- особенности построения статистического ряда результатов незавершенных испытаний по интервалам наработки;
- построение гистограмм и теоретических кривых распределения наработок до отказа.

Общие сведения

При испытаниях на надёжность нередко возникают ситуации, когда к моменту анализа информации не все изделия доведены до предельного состояния. Часть изделий в партии обследования остаётся работоспособной и естественно, содержит в себе определённую информацию о реальных показателях надёжности. В этом случае мы имеем дело с незавершёнными испытаниями, причинами которых могут быть: неодновременность начала испытаний, большая длительность их проведения, снятие части изделий с испытаний из-за возникновения отказов других элементов, чем изучаемые, аварии и другие причины.

При эксплуатационных испытаниях автомобилей наиболее типичными являются случаи, когда к моменту их завершения в выборке остаются работоспособные изделия, наработка которых до предельного состояния не установлена. Например, при наблюдении за партией автомобилей $N = 30$ ед. на наработке 150 тыс. км отказало 25 исследуемых элементов. Нарботки остальных пяти элементов не установлены, так как испытания этих автомобилей были приостановлены по различным причинам. В этом случае оценка показателей надёжности только по 25 отказавшим элементам была бы необъективной, так как не учтены потенциальные ресурсы пяти оставшихся элементов, испытания по которым были приостановлены.

При незавершённых испытаниях обработка информации о надёжности осуществляется на основе *прогнозирования отказов* с учётом наработок оставшихся работоспособных элементов к моменту приостановки испытаний. Обработка результатов испытаний в этом случае отличается от обработки результатов завершённых испытаний особенностями построения статистического ряда распределения. Эти особенности заключаются в следующем.

Так же, как и при завершённых испытаниях определяются число интервалов наработки и их границы. Составляется таблица распределения наработок отказавших и не отказавших из-за приостановки испытаний изделий по интервалам группировки. Вероятность отказа к концу интервала с учётом не отказавших изделий определяется по формуле

$$F(t) = \frac{m_i}{N+1}, \quad (1)$$

где N – общее количество изделий в выборке; m_i – прогнозируемое количество отказов к концу i -го интервала с учётом не отказавших из-за приостановки испытаний изделий, которое определяется по формуле:

$$m_i = m_{(i-1)} + k_i n_i, \quad (2)$$

где $m_{(i-1)}$ – прогнозируемое число отказов в интервале $(i - 1)$; n_i – количество отказавших изделий в i -м интервале; $k_i \cdot n_i$ – прогнозируемое количество отказов в i -м интервале; k_i – коэффициент приращения количества отказов в i -м интервале наработки, который определяется по формуле:

$$k_i = \frac{N+1 - m_{(i-1)}}{N+1 - \sum g_i - \sum n_{(i-1)}}, \quad (3)$$

где $\sum g_i$ – общее количество выбывших из-за приостановки испытаний изделий к концу i -го интервала; $\sum n_{(i-1)}$ – общее количество отказов к концу i -го интервала.

Для первого интервала

$$k_1 = \frac{N+1-0}{N+1-g_1-0}; \quad m_1 = k_1 n_1.$$

Для второго интервала

$$k_2 = \frac{N+1-m_1}{N+1-\sum_1^2 g_i - n_i}; \quad m_2 = m_1 + k_2 n_2 \text{ и т. д.}$$

Рассмотрим изложенный метод обработки информации о надёжности на конкретном примере.

Выполнение работы

После изучения указаний студент получает *персональные статистические данные* по наработкам до отказа агрегата, узла или системы автомобиля и выполняет необходимые расчеты.

Продолжительность работы 2 ... 4 часа.

Задание. По предложенным преподавателем статистическим данным, полученным по результатам незавершенных испытаний, требуется:

- рассчитать прогнозируемое число отказов по интервалам наработки m_i , вероятности отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$
- определить средний ресурс изделия $t_{\text{ср}}$;
- построить графики функций распределения $F(t)$ и $P(t)$.

Пример. При проведении эксплуатационных испытаний из выборки, объемом 40 автомобилей, 10 были сняты с испытаний по разным причинам, не относящимся к отказам тормозных накладок. Нарботки до отказа накладок оставшихся 30 автомобилей представлены в табл. 1. По остальным 10 автомобилям испытания были приостановлены на следующих наработках с начала эксплуатации: 36, 42, 45, 53, 55, 57, 62, 64, 67, 74 тыс. км. Требуется определить показатели надёжности тормозных накладок с учётом снятых с испытаний автомобилей.

Таблица 1. Значения наработок тормозных накладок до отказа

42	49	53	49	54	47	44	32	57	51
67	72	39	48	56	35	41	59	76	27
58	36	64	44	52	47	55	43	45	62

Полученные данные испытаний представим в виде упорядоченного статистического ряда (табл. 2). В эту же таблицу сведем результаты расчетов

По формулам (1), (2), (3) рассчитываем значения k_i , m_i , $F(t_i)$ по интервалам наработки.

Для первого интервала

$$k_1 = \frac{40+1}{40+1-0-0} = 1; \quad m_1 = 1 \cdot 1 = 1; \quad F(t_1) = \frac{1}{40+1} = 0,024.$$

Для второго интервала

$$k_2 = \frac{40+1-1}{40+1-1-1} = 1,026; \quad m_2 = 1+1,026 \cdot 4 = 5,104; \quad F(t_2) = \frac{5,104}{41} = 0,124.$$

Для третьего интервала

$$k_3 = \frac{40+1-5,104}{40+1-3-5} = 1,088; \quad m_3 = 1+1,088 \cdot 11 = 17,072; \quad F(t_3) = \frac{17,072}{41} = 0,416.$$

Таким же образом рассчитываем k_i , m_i , $F(t_i)$ для остальных интервалов наработки и результаты сведём в таблицу 2. После того как определено прогнозируемое количество отказов m_i по интервалам наработки, дальнейшая обработка информации проводится так же, как и при завершённых испытаниях.

Таблица 2. Результаты обработки информации при незавершённых испытаниях

Интервал наработки тыс. км	n_i	Σn_i	g_i	Σg_i	k_i	$k_i \cdot n_i$	m_i	$F(t_i)$	$P(t_i)$
20 – 30	1	1	-	-	1	1	1	0,024	0,976
30 – 40	4	5	1	1	1,026	4,104	5,104	0,124	0,876
40 – 50	11	16	2	3	1,088	11,968	17,072	0,416	0,584
50 – 60	9	25	3	6	1,259	11,331	28,403	0,693	0,307
60 – 70	3	28	3	9	1,799	5,397	33,800	0,824	0,176
70 – 80	2	30	1	10	2,400	4,800	38,600	0,941	0,059

По найденным значениям $F(t)$ и $P(t)$ строим соответствующие графики этих функций (рис. 1).

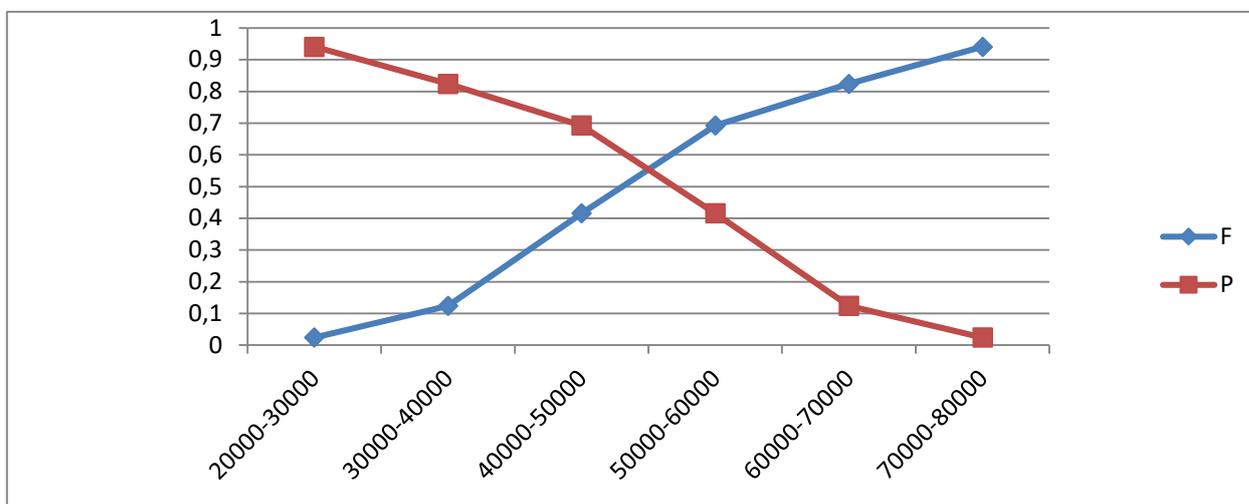


Рис. 1. Графики функций вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ тормозных накладок автомобиля

Прогнозируемый средний ресурс тормозных накладок с учётом снятых с испытаний автомобилей составит:

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k t_i (k_i n_i) = \frac{1}{40} \{ 25 \cdot 1 + 35 \cdot 4,194 + 45 \cdot 11,968 + 55 \cdot 11,331 + 65 \cdot 5,397 + 75 \cdot 4,8 \} = 51,2 \text{ тыс. км.}$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов;
- графики функций распределения $F(t)$ и $P(t)$;
- заключение и выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются особенности построения вариационного ряда при незавершенных испытаниях?
2. Как определяется прогнозируемое число отказов по интервалам наработки по результатам незавершенных испытаний?
3. Что понимается под коэффициентом приращения количества отказов в i -м интервале наработки изделия?
3. Определения предельных нормативов диагностических параметров.

Работа № 10

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 функ-

ции 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,а). 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 .

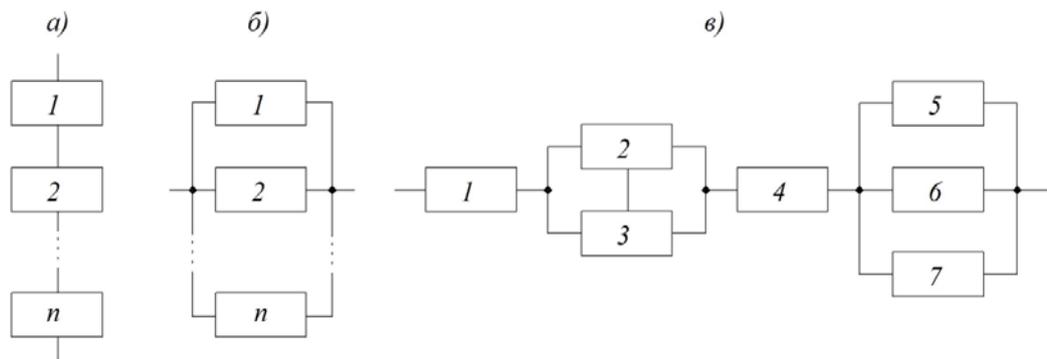


Рис. 1. Схемы соединения конструктивных элементов:

а – последовательное; *б* – параллельное; *в* – смешанное

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

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

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,в). Такая схема соединения носит название *смешанной*. При расчете надежности при такой схеме соединения сначала определяются вероятности безотказной работы ее подсистем, а затем – вероятность безотказной работы всей технической системы. Например, для схемы соединения, показанной на рис.1,в, 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.

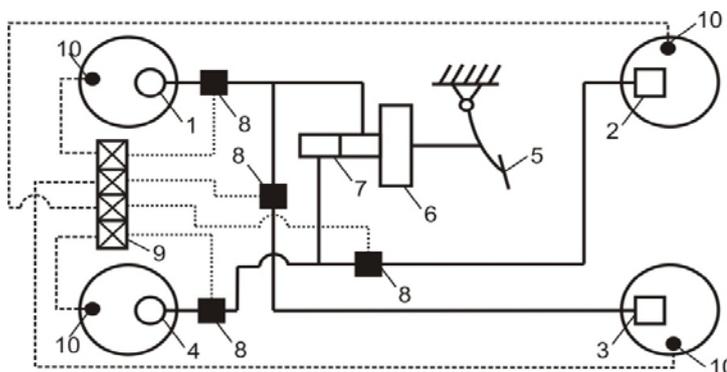


Рис.2. Принципиальная схема тормозной системы автомобиля ВА3-21703-01-018: 1,4 – дисковый тормозной механизм; 2,3 – барабанный тормозной механизм; 5 – педаль; 6 – вакуумный усилитель; 7 – главный тормозной цилиндр; 8 – модулятор; 9 – блок управления АБС; 10 – датчик

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.

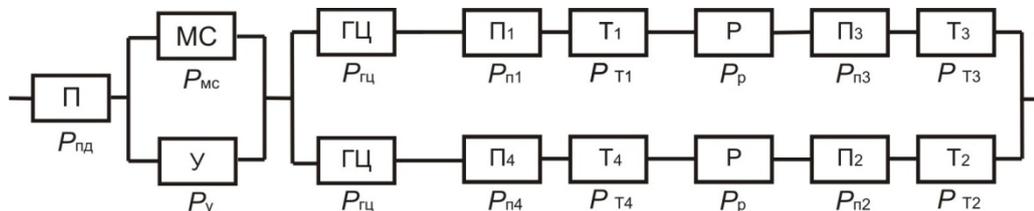


Рис.3. Структурная схема двухконтурной тормозной системы автомобиля ВАЗ-21703-01: П – педаль; МС – механическая связь; У – усилитель; ГЦ – главный тормозной цилиндр; П_і – тормозной привод колеса (рабочий цилиндр с трубопроводом); Т_і – тормозной механизм колеса; Р – регулятор тормозных сил.

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

$$P_{общ} = P_{пд} \cdot (1 - (1 - P_{мс}) \cdot (1 - P_{у})) \cdot (1 - (1 - P_{гц} \cdot P_{п1}^2 \cdot P_{т1}^2)^2) \quad (6)$$

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

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

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 № 11

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.

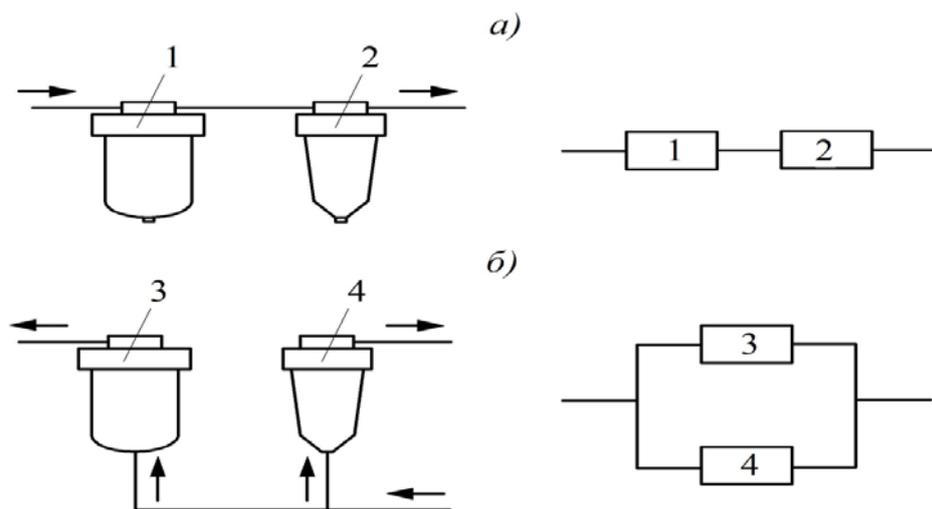


Рис. 1. Схемы соединения фильтров:
а - в системе питания; *б* - в системе смазки

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 различны-

ми. 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

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

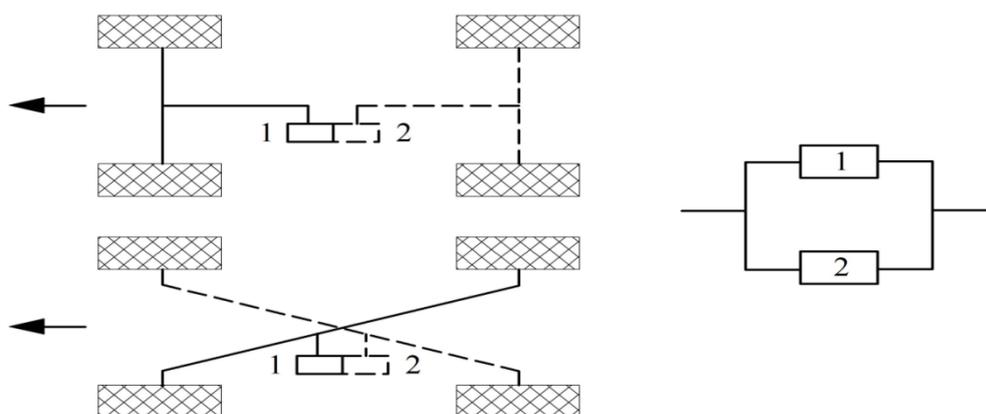


Рис. 2. Схемы тормозных систем с осевым (а) и диагональным (б) разделением контуров

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.

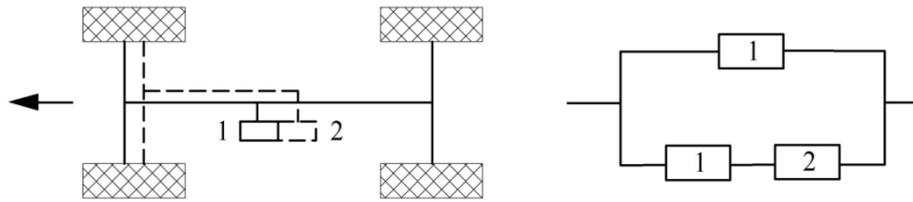


Рис. 3. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура

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

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

Более надежной является схема раздельного 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:

$$P(t) = 1 - (1 - P_1) (1 - P_1 P_2) = 0,981.$$

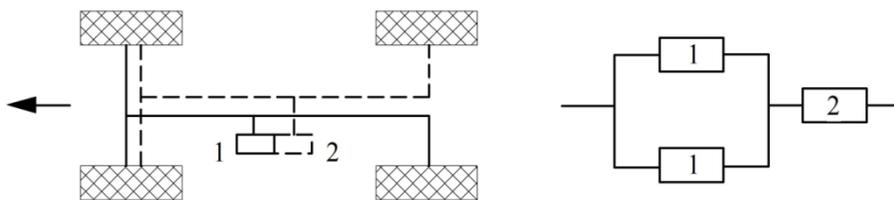


Рис. 4. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура и одного из цилиндров задних колес

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

$$P(t) = 1 - (1 - P_1 P_2)^2 = 0,964$$

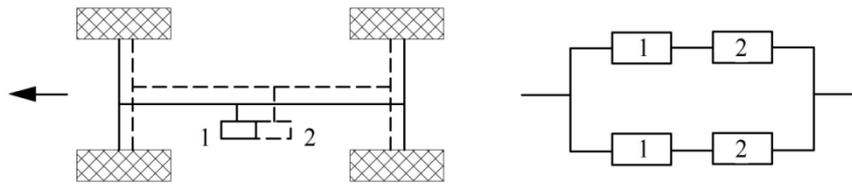


Рис. 5. Схема тормозной системы с общим резервированием

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.

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 об-

ладает большей эффективностью торможения в случае выхода из строя одного из контуров, чем схема а).

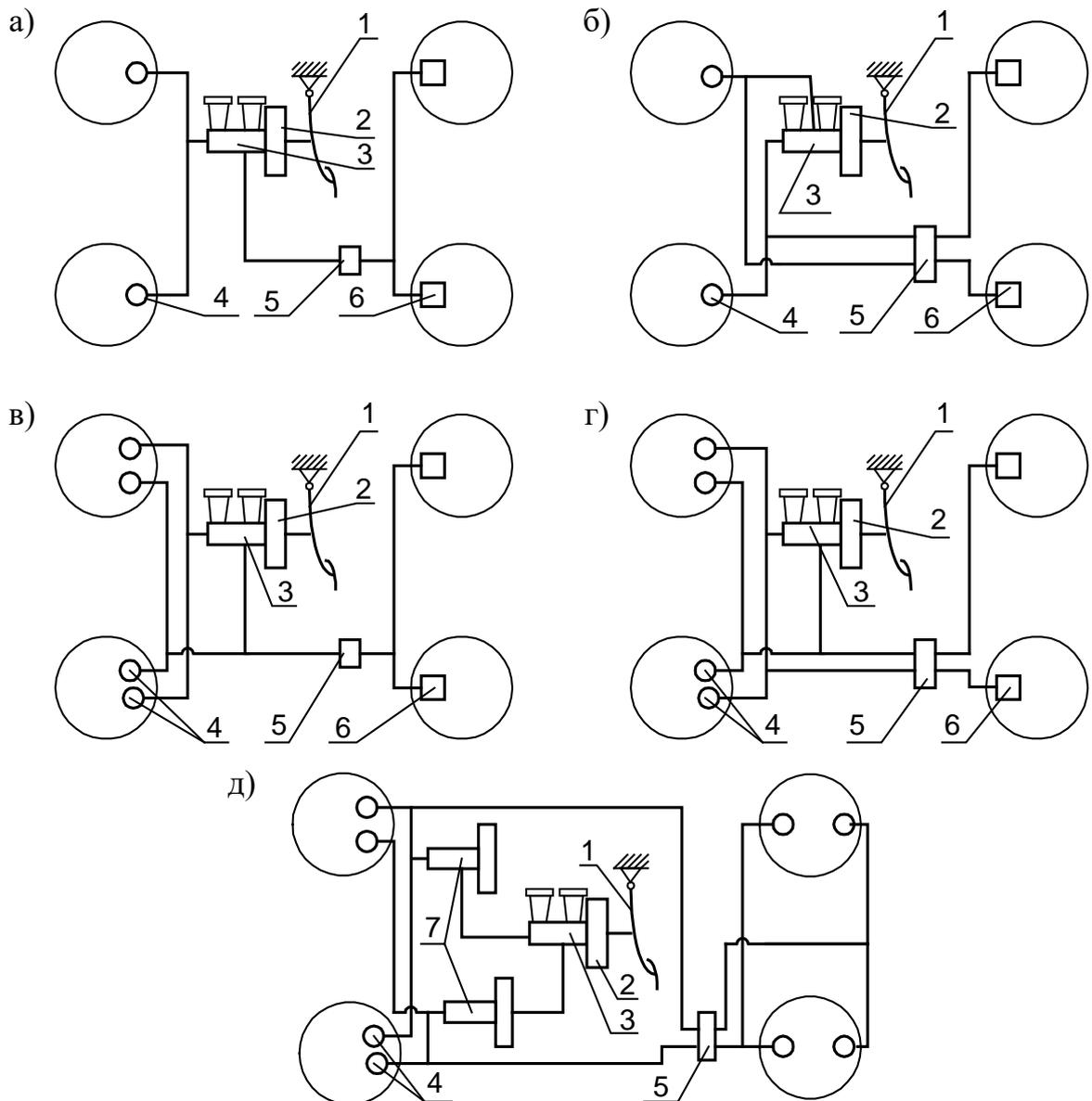


Рис.6. Двухконтурные тормозные системы автомобилей (гидравлический тормозной привод): а – двухконтурная система с разделением по осям; б – двухконтурная диагональная система; в – система с резервной подсистемой; г – с резервной системой; д – с полным дублированием. Обозначения: 1 – тормозная педаль;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

Схема 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 ос-

новой 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.

Работа № 12

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ОБОСНОВАНИЕ ИХ НОРМАТИВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Цель работы – изучить:

- требования к выбору диагностических параметров;
- нормирование диагностических параметров.

Общие сведения

Техническое состояние машин (агрегатов, узлов, механизмов) определяется значениями структурных параметров, которые в процессе эксплуатации претерпевают различные изменения. К структурным параметрам, относятся зазоры в сопряжениях, изменение формы и размеров деталей, другие параметры, измерение которых связано с необходимостью проведения разборочно-сборочных работ. Это повышает трудоемкость контроля и существенно снижает ресурс контролируемого объекта.

Изменения структурных параметров сопровождается изменениями параметров рабочих и сопутствующих выходных процессов, которые могут измеряться без разборки контролируемого объекта. Такие параметры носят название диагностических. Таким образом, *диагностические параметры* – это косвенные величины, связанные со структурными параметрами, доступные измерению и несущие недостаточную информацию о техническом состоянии объекта.

Диагностические параметры, выбранные для оценки технического состояния объекта, должны удовлетворять требованиям однозначности, стабильности, чувствительности, информативности и технологичности.

Под однозначностью понимают соответствие каждому значению диагностического параметра S только одного состояния диагностируемого объекта (рис.1). Это означает, что в диапазоне изменения структурного параметра Y от начального значения до предельного функция диагностического параметра $S = f(Y)$ не имеет экстремума.

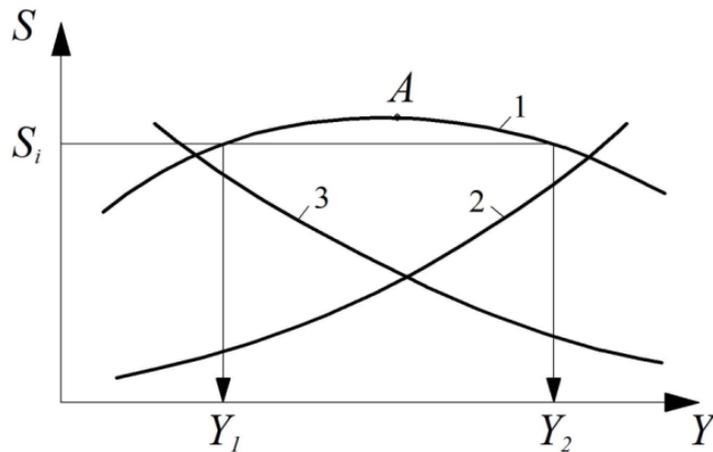


Рис. 1. Закономерности изменения диагностических параметров: 1 – не обладающий однозначной зависимостью (имеется экстремум в точке A); 2 и 3 – обладающие однозначной зависимостью

Стабильность диагностического параметра определяется отклонениями его величины от среднего значения при неизменном значении структурного параметра Y_i (рис.2).

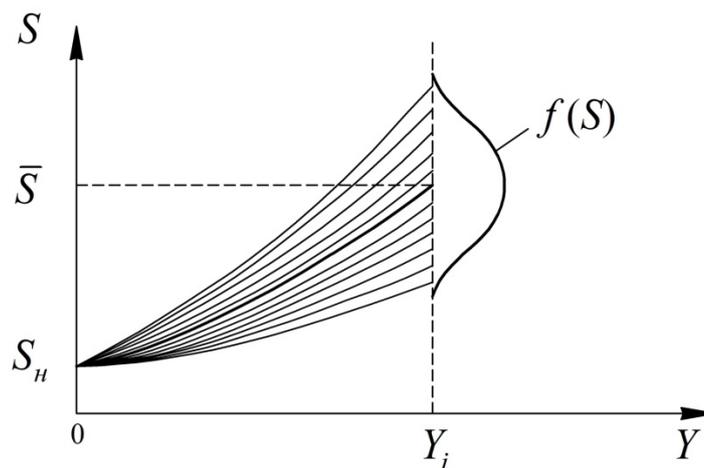


Рис. 2. Рассеивание результатов измерения диагностического параметра

Это свойство диагностического параметра характеризует достоверность диагноза и может быть оценена величиной среднего квадратического отклонения, характеризующего меру рассеивания диагностического параметра S_i относительно центра группирования \bar{S}

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где n – число измерений диагностического параметра.

Чувствительность φ диагностического параметра характеризуется изменением его значения с изменением структурного параметра (рис. 3). Из приведенной схемы видно, что при изменении структурного параметра на величину ΔY диагностические параметры S_1 и S_2 изменились на разную величину ($\Delta S_1 > \Delta S_2$). Следовательно, чувствительность диагностического параметра S_1 при оценке технического состояния объекта больше чувствительности параметра S_2 , т.е. $\varphi_1 > \varphi_2$.

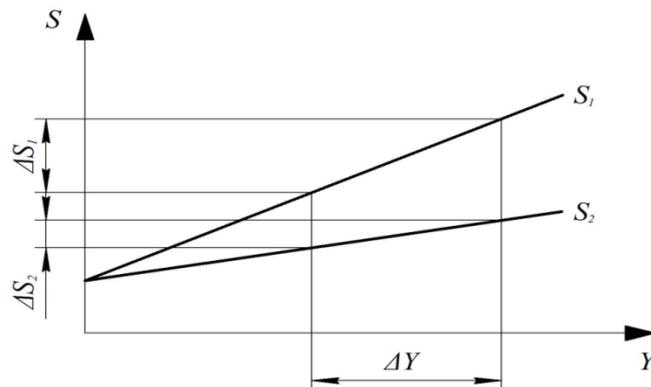


Рис. 3. Схема определения чувствительности диагностических параметров

Информативность диагностического параметра является его важнейшим свойством при оценке технического состояния сложных систем.

При диагностировании автомобиля, как сложной технической системы, используется комплекс диагностических параметров, информативность которых различна. Если диагностический параметр малоинформативен, то распределение их значений у большого числа технически исправных и неисправных объектов отличается незначительно. Это означает, что диагностический параметр не позволяет с достаточной надежностью отличить исправный объект от неисправного (рис.4, а). В том случае, когда диагностический параметр обладает высокой информативностью, распределение исправных объектов существенно отличается от неисправных и чем больше это отличие, тем выше информативность диагностического параметра (рис.4, б).

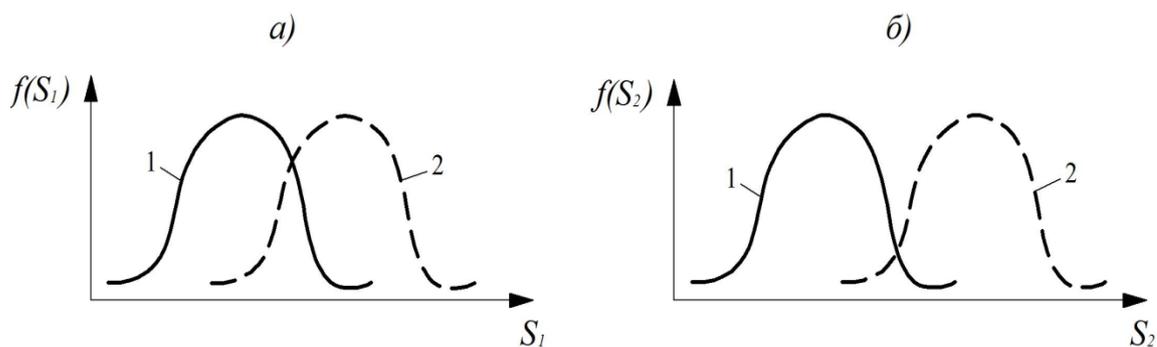


Рис.4. Распределение значений малоинформативного S_1 и высокоинформативного S_2 диагностических параметров: 1, 2 – исправное и неисправное состояния объектов

Технологичность измерения параметра определяется удобством подключения диагностической аппаратуры, простотой измерения и обработки полученных результатов.

Вполне очевидно, что чем больше диагностические параметры удовлетворяют рассматриваемым требованиям, тем эффективнее их использование при определении технического состояния объекта.

Нормирование диагностических параметров

Важнейшим этапом разработки системы диагностирования является определение нормативных значений диагностических параметров, количественно оценивающих техническое состояние объекта. В качестве нормативных показателей (или просто нормативов) при диагностировании автомобилей и их элементов служат: номинальное (или начальное), предельное и допустимое S_d значения диагностического параметра.

Номинальное значение диагностического параметра S_n определяет исходное состояние объекта и соответствует новым, технически исправным машинам, агрегатам, узлам. Он может быть задан техническими условиями (тормозной путь, люфт рулевого колеса, схождение и развал колес и др.) или найден как средняя величина для данной совокупности объектов.

Предельное значение параметра S_p соответствует такому состоянию объекта, когда его дальнейшая эксплуатация становится технически невозможной или экономически невыгодной. Он устанавливается по техническим или технико-экономическим критериям, которые определяют возникновение отказа (неисправности) или экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Допустимое значение диагностического параметра S_d представляет собой ужесточенную величину предельного, при которой обеспечивается заданный уровень безотказной работы на межконтрольной наработке.

Диагностические нормативы можно подразделить на три основные группы:

- нормативы, устанавливаемые государственными стандартами;
- нормативы, определяемые конструктивными и технологическими факторами при изготовлении объекта;
- нормативы, определяемые статистическими методами с учетом реальных условий эксплуатации.

Нормативы первой группы устанавливаются для узлов и систем, обеспечивающих безопасность движения автомобиля или оказывающих отрицательное влияние на окружающую среду. К ним относятся параметры, оценивающие техническое состояние тормозного и рулевого управлений, шин, колес, систем освещения и сигнализации, а также параметры контроля состава отработавших газов, вибраций и шума. Эти параметры подлежат строгому соблюдению и их индивидуальная корректировка возможна только в сторону ужесточения.

Ко *второй группе* относятся диагностические параметры, устанавливаемые техническими условиями заводов - изготовителей, или инструкциями по эксплуатации изделий. Это, например, зазоры в различных сопряжениях, углы установки колес, люфты и т.д. Нормативные значения диагностических параметров этого вида устанавливаются на основании исследований их функциональных связей с нормативными значениями структурных параметров, которые определяются на стадии разработки объектов и проведении их испытаний.

Нормативы третьей группы составляют параметры, на интенсивность изменения которых существенное влияние оказывают условия эксплуатации, из-за чего они не могут быть едиными для всех изделий. Их определение осуществляется дифференцированно для конкретных условий эксплуатации с помощью статистических методов, учитывающих закономерности и интенсивность изменения технического состояния объекта.

Сущность метода заключается в том, что по результатам обследования представительной партии автомобилей строится гистограмма распределения значений диагностического параметра и аппроксимирующая ее теоретическая кривая. Предполагается, что полученное распределение содержит диагностические параметры, оценивающие только исправные объекты (объекты с неисправным состоянием из выборки исключаются). Тем не менее, не следует исключать, что крайние значения диагностических параметров в распределении могут соответствовать как исправному, так и неисправному состоянию объекта.

Поэтому, по аналогии с принятой в теории надежности методикой, область рассеивания значений диагностического параметра ограничивают пределами, соответствующими требуемому уровню вероятности безотказной работы. Для ответственных узлов и механизмов (например, непосредственно

влияющих на безопасность движения), целесообразно использовать более жесткое ограничение распределения диагностического параметра уровнем вероятности $P = 0,85$, для остальных – менее жесткое $P = 0,95$. Полученные таким образом граничные значения полученного распределения считают предельными нормативами диагностического параметра $S_{п}$.

Ограничение области распределения диагностического параметра в зависимости от физической сущности контролируемого объекта может быть верхним, нижним или двухсторонним, когда параметр ограничивается и верхним, и нижним уровнем доверительной вероятности (рис 5).

На практике с относительно небольшой погрешностью при определении предельных значений диагностических параметров может быть использован метод прибавления к найденному среднеарифметическому значению параметра \bar{S} одно – или полутора кратного значения среднеквадратического отклонения σ .

При одностороннем верхнем ограничении:

$$S_{n0,85} = \bar{S} + \sigma; \quad S_{n0,95} = \bar{S} + 1,5\sigma. \quad (2)$$

При одностороннем нижнем ограничении:

$$S_{n0,85} = \bar{S} - \sigma; \quad S_{n0,95} = \bar{S} - 1,5\sigma. \quad (3)$$

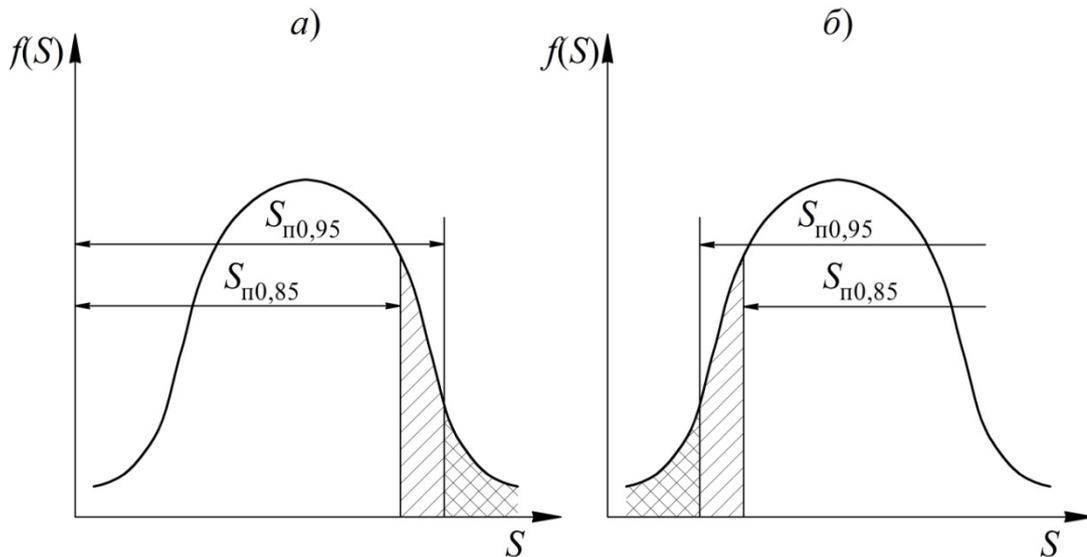


Рис. 5. Схема определения предельных нормативов диагностических параметров

Практическая реализация процедуры определения предельных значений диагностических параметров, учитывающих условия эксплуатации, включает в себя следующие этапы:

- по результатам измерения диагностических параметров представительной выборки автомобилей, находящихся в исправном состоя-

нии, строится гистограмма и аппроксимирующий ее теоретический закон распределения;

- находятся параметры распределения (среднее значение \bar{S} , среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации v);
- по виду гистограммы и значению коэффициента вариации v подбирается теоретический закон распределения случайной величины диагностического параметра с проверкой правильности выбора по критерию согласия χ^2 Пирсона;
- зная закон распределения диагностического параметра и принятый уровень вероятности P (0,85 или 0,95), определяют его предельные нормативы.

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 2 ... 4 часа.

Задание. По заданному вариационному ряду построить гистограмму распределения значений диагностического параметра; рассчитать параметры распределения (среднее значение \bar{S} , среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации v); подобрать теоретический закон распределения диагностического параметра с проверкой правильности выбора по критерию согласия χ^2 Пирсона; по принятому уровню вероятности P (0,85 или 0,95), определить его предельные нормативы.

Пример. Определить предельное значение люфта рулевого колеса $\alpha_{рм}^{пр}$, вызванное изменением зазора в зубчатом зацеплении рулевого механизма автомобиля.

Результаты измерения значений люфта в рулевом механизме $\alpha_{рм}$ выборки обследования ($n = 23$ ед.) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений люфтов в рулевом механизме

№ п/п	$\alpha_{рм}$	№ п/п	$\alpha_{рм}$	№ п/п	$\alpha_{рм}$
1	2,3	9	1,9	17	2,1
2	1,8	10	1,7	18	2
3	2,3	11	2,2	19	2
4	1,8	12	2,1	20	2,2
5	2,4	13	2,2	21	2,4
6	2,2	14	2,3	22	2,1
7	2,3	15	2,4	23	2,1
8	1,8	16	1,9		

По результатам измерений с помощью программы STATISTICA строим гистограмму распределения диагностического параметра α_{pm} , аппроксимирующий ее теоретический закон (рис.6) и определяем числовые характеристики полученного распределения:

- среднее арифметическое результатов измерений:

$$\bar{\alpha}_{pm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_{pmi} = 2,126 \text{ град.};$$

- среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma(\alpha_{pm}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_{pmi} - \bar{\alpha}_{pm})^2} = 0,202 \text{ град.};$$

- коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma(\alpha_{pm})}{\bar{\alpha}_{pm}} = 0,10.$$

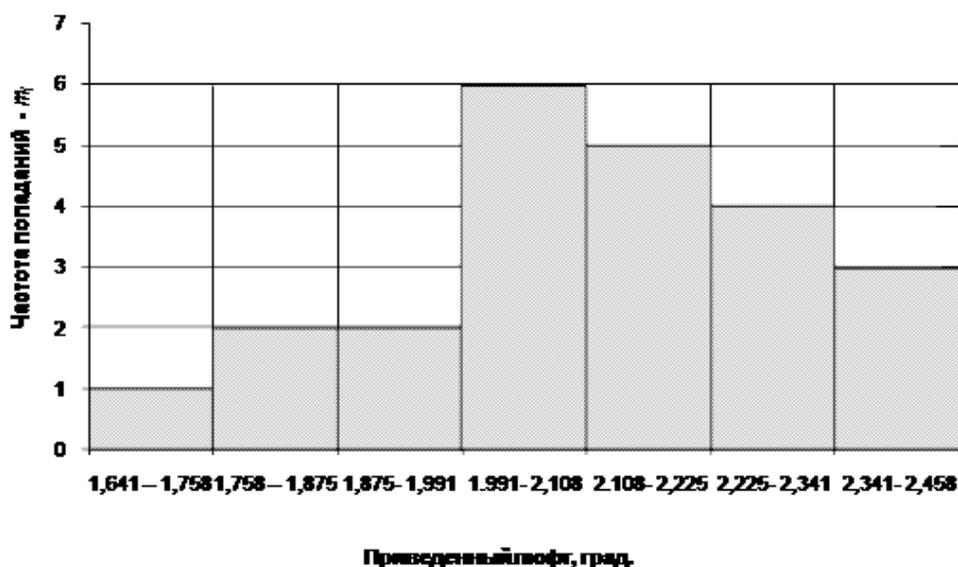


Рис. 6. Гистограмма распределения значений люфта α_{pm} , град.

По виду гистограммы и значению коэффициента вариации $v = 0,1$ предполагаем, что распределение значений люфта подчиняется нормальному закону. Проверка гипотезы о нормальном распределении экспериментальных данных по критерию согласия подтвердила правильность выбора теоретического закона.

Предельный норматив люфта в рулевом механизме $\alpha_{\text{рм}}^{\text{пр}}$, ограниченный уровнем вероятности $P \leq 0,85$ находим по формуле (2)

$$\alpha_{\text{рм}}^{\text{пр}} = 2,126 + 0,202 = 2,3 \text{ град.}$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов показателей надежности;
- гистограмму распределения значений диагностического параметра;
- подбор закона распределения и проверку его корректности по критерию согласия χ^2 Пирсона;
- расчет предельного норматива диагностического параметра

Контрольные вопросы

1. Требования к выбору диагностических параметров, оценивающих техническое состояние объекта.
2. Нормативные значения диагностических параметров.
3. Определения предельных нормативов диагностических параметров.

Работа № 13

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АГРЕГАТОВ И СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Цель работы – изучить:

- методы прогнозирования ресурса автотранспортных средств;
- процесс прогнозирования остаточного ресурса автомобилей с использованием статистических методов.

Общие сведения

Одной из основных задач диагностирования является прогнозирование остаточного ресурса объекта, под которым понимается определение продолжительности его исправной работы до предельного состояния.

На начальной стадии создания автомобиля (проектирование и конструирование) оценку его ресурса осуществляют, в основном, по результатам конструкторских расчетов и статистических данных об его аналогах. Прогнозируемый при этом ресурс является заданной величиной, соответствующей некоторой вероятности, с которой ресурс должен быть реализован в эксплуатации.

В реальных условиях эксплуатации ресурс автомобиля из-за воздействия на него множества случайных факторов варьирует в довольно широких пределах (рис.1) и характеризуется дифференциальной функцией распределения наработок до предельного состояния $f(t)$. Поэтому на стадии проектирования в качестве прогнозируемого ресурса в технической документации указывается некоторый средний ресурс t_{cp} – математическое ожидание наработки автомобиля до предельного состояния $Y_{пр}$.

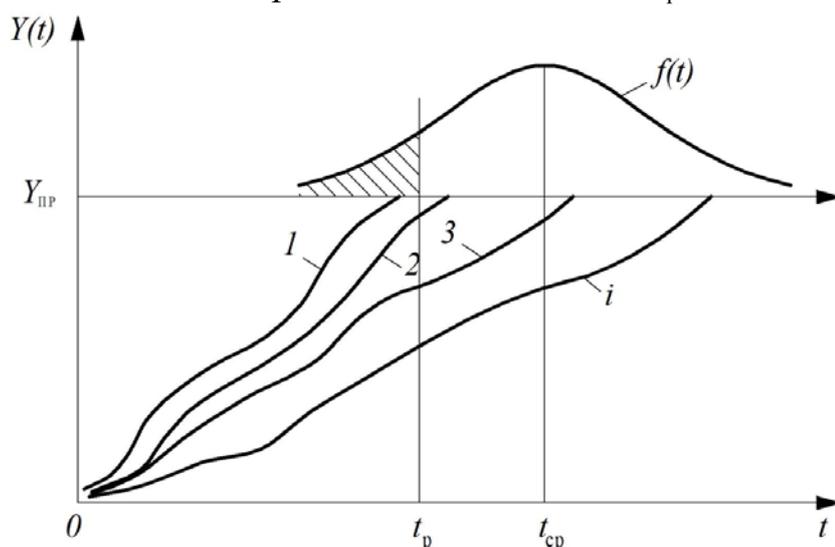


Рис. 1. Графическая интерпретация реализации автомобилем ресурса

Предельного состояния автомобиль достигает в момент пересечения реализацией $Y(t)$ уровня $Y_{пр}$, устанавливаемого нормативно-технической документацией. Фактические моменты достижения объектами этого состояния могут существенно различаться в зависимости от их индивидуальных свойств и условий эксплуатации. Поэтому ресурс объекта, следует считать случайной величиной и может быть описан только вероятностными моделями. В качестве такой модели обычно используется плотность распределения наработок объекта до предельного состояния. В этом случае теоретическое

значение среднего ресурса автомобиля от начала его эксплуатации до списания может быть определено из выражения

$$t_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt,$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до предельного состояния.

В отличие от стадии проектирования, когда прогнозируется ресурс всей генеральной совокупности создаваемых автомобилей, прогнозирование на стадии эксплуатации выполняют для конкретных автотранспортных средств (АТС), их агрегатов и узлов. В этом случае оценивается индивидуальный остаточный ресурс объекта, т.е. возможная продолжительность его эксплуатации от момента контроля технического состояния до достижения им предельного состояния. Отличается он от ресурса тем, что в качестве начала отсчета принимается текущая наработка, до которой объект уже какое-то время эксплуатировался, и часть установленного технической документацией ресурса уже реализовал.

Современные методы прогнозирования технического состояния объектов подразделяются на три основные группы.

1. Методы экспертных оценок, сущность которых сводится к обобщению, статистической обработке и анализу мнений специалистов. Эксперты обосновывают свою точку зрения на собственном опыте, литературных данных, анализе эксплуатационной надежности узлов и механизмов автомобилей и т. д.

2. Методы моделирования, базирующиеся на основных положениях теории подобия, формировании модели изучаемого объекта, проведении экспериментальных исследований и пересчете полученных показателей с модели на натуральный объект.

3. Статистические методы, из которых наиболее широкое распространение получил метод экстраполяции.

Наиболее достоверными при прогнозировании индивидуального остаточного ресурса автомобиля в условиях эксплуатации являются статистические методы, основанные на объективной оценке его технического состояния в текущий момент времени. Процесс прогнозирования с использованием статистических методов предусматривает выполнение следующих этапов:

- оценку технического состояния объекта с помощью диагностического и контрольно – измерительного оборудования;
- разработку аналитического уравнения, описывающего закономерности изменения этого состояния во времени или по наработке;

– экстраполяцию полученного уравнения и определение остаточного ресурса или сроков выполнения очередного контроля технического состояния объекта.

Исчерпание заложенного при проектировании ресурса (наступление предельного состояния) обусловлено постепенным накоплением различных повреждений. Развитие таких повреждений в материалах деталей узлах и агрегатах в зависимости от времени или пробега носит плавный, монотонный характер, приводящий к возникновению так называемых постепенных отказов, поэтому с некоторой вероятностью может быть описано каким-либо аналитическим уравнением. Для постепенных отказов изменение параметра технического состояния конкретного изделия или среднего значения для группы изделий аналитически достаточно хорошо описывается двумя функциями:

- линейным уравнением $y = y_n + a_1 t$;
- степенной функцией $y = y_n + a_1 t^b$,

где t – наработка изделия; y_n – начальное значение параметра технического состояния; a_1 – интенсивность изменения параметра технического состояния, зависящая от конструкции и условий эксплуатации; b – показатель степени, характеризующий изменение параметра y от t .

Изменение аналогового диагностического параметра по наработке для большинства узлов и агрегатов автомобиля описывается теми же функциями, что и параметры технического состояния. При прогнозировании остаточного ресурса силовой установки автомобиля, например, изменение диагностического параметра по наработке с достаточной степенью точности может быть описано степенной функцией

$$S = S_n + \nu t^\alpha,$$

где S_n – начальное значение диагностического параметра; ν – интенсивность изменения диагностического параметра по наработке; t – наработка изделия; α – показатель степени, определяющий зависимость диагностического параметра S от наработки t .

Графическая интерпретация этой зависимости представлена на рис.2.

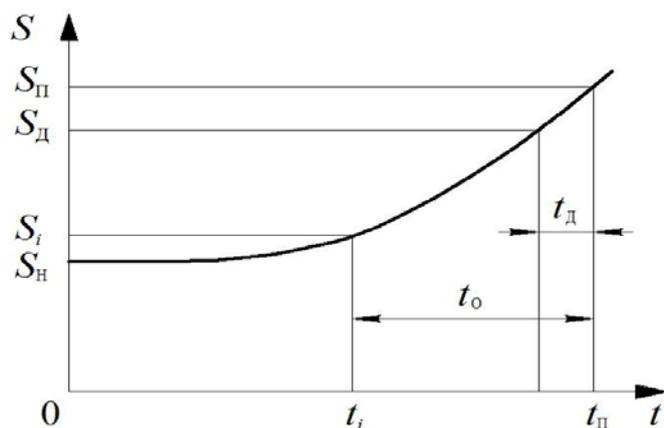


Рис. 2. Схема определения остаточного ресурса по реализации диагностического параметра: S_i, S_n, S_p – текущее, номинальное и предельное значение диагностического параметра; t_i, t_o, t_p – текущий, остаточный и полный ресурс соответственно

Из приведенной схемы видно, что остаточный ресурс объекта t_o представляет собой разность между полным ресурсом t_p , который соответствует предельному значению диагностического параметра S_p , и продолжительностью его эксплуатации, предшествующей прогнозируемому периоду t_i . Полный t_p и остаточный t_o ресурсы объекта после наработки t , предшествующей прогнозируемому периоду, при степенной зависимости диагностического параметра по наработке определяются из выражений:

$$t_p = \alpha \sqrt{\frac{|S_p - S_n|}{v}}; \quad t_o = t \left[\left(\frac{S_p - S_n}{S_i - S_n} \right)^{\frac{1}{a}} - 1 \right],$$

где S_n, S_p – номинальное и предельное значения диагностического параметра.

Для узлов и систем автомобиля, обеспечивающих безопасность движения или оказывающих отрицательное влияние на окружающую среду, значения номинального и предельного диагностических параметров устанавливаются нормативно-технической документацией заводов-изготовителей. Это, например, зазоры в различных сопряжениях, люфты, углы установки колес, давление в цилиндрах двигателя в конце такта сжатия и т.д.

Номинальное значение диагностического параметра S_n определяет исходное состояние объекта и соответствует новым, технически исправным машинам, агрегатам, узлам. Оно может быть задано техническими условиями (тормозной путь, люфт рулевого колеса, сходжение и развал колес и др.) или найдено как средняя величина для данной совокупности объектов. Значения показателя α определяются опытным путем для различных сопряжений механизмов на основе обработки статистического материала и представляют собой некоторые усредненные величины для построения функции изменения диагностического параметра по наработке.

Выполнение работы

После изучения указаний студент получает *персональные данные* по диагностическим параметрам, оценивающим техническое состояние двигателей, и выполняет необходимые расчеты.

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

Продолжительность работы 2 часа.

Задание. По заданным результатам диагностирования двигателя рассчитать его остаточный ресурс.

Пример. Определить остаточный ресурс двигателя с использованием диагностического параметра – давление в конце такта сжатия.

В табл. 1 приведены установленные техническими условиями завода-изготовителя нормативные значения диагностических параметров, а также значения показателя α , найденные по результатам экспериментальных исследований технического состояния цилиндропоршневой группы двигателей.

Таблица 1. Нормативные значения параметров диагностирования технического состояния ЦПГ и показателя α для этих параметров

№ п/п	Диагностический параметр	Номинальное значение	Предельное значение	Показатель α
1	Давление в конце такта сжатия, кгс/см ²	12	9,6	1,3
2	Относительная утечка воздуха при положении поршня в ВМТ, кг/см ² в течение не менее 5 с.	Снижение с 1,5 до 1,0	Снижение с 1,5 до 0,75	1,6
3	Расход картерных газов при 4000 мин ⁻¹ , л/мин не более	22	62	1,5
4	Давление в главной масляной магистрали при 2500 мин ⁻¹ , кгс/см ²	5,0	3,0	1,4

Остаточный ресурс рассчитывается по каждому диагностическому параметру и в качестве основного принимается его минимальное значение. По параметру давления в конце такта сжатия, например, на этой наработке его текущее значение составило 11 кгс/см² при номинальном 12 кгс/см² и предельном 9,6 кгс/см². Прогнозируемый остаточный ресурс ЦПГ двигателя до достижения им предельного состояния будет равен:

$$t_o = 154 \left[\left(\frac{9,6 - 12}{11 - 12} \right)^{\frac{1}{1,3}} - 1 \right] = 148 \text{ тыс. км.}$$

По остальным диагностическим параметрам рассчитанные значения остаточного ресурса приведены в табл. 8.5.

Таблица 8.5. Значения остаточного ресурса ЦПГ по результатам диагностирования

Диагностический параметр	Значение параметра			t_o , тыс. км
	Текущее	Номинальное	Предельное	
Относительная утечка воздуха при положении поршня в ВМТ в течение не менее 5 сек. с 1,5 кгс/см ² до:	0,9	1,0	0,75	119
Расход картерных газов при 4000 мин ⁻¹ , л/мин	40	22	62	108
Давление в главной масляной магистрали при 2500 мин ⁻¹ , кгс/см ²	4	5	3	99

В результате выполненных расчетов прогнозируемый остаточный ресурс ЦПГ принимает минимальное значение по параметру «давление в главной масляной магистрали», в соответствии с которым $t_o = 99$ тыс. км.

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- аналитические зависимости изменения диагностических параметров по наработке;
- параметры, оценивающие состояние цилиндропоршневой группы двигателя;
- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов остаточного ресурса.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под прогнозированием остаточного ресурса?
2. Аналитические уравнения, описывающие закономерности изменения технического состояния объекта во времени или по наработке.
3. Определение остаточного ресурса по реализации диагностического параметра.

Работа № 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Цель работы – изучить:

- методы прогнозирования ресурса автотранспортных средств;
- процесс прогнозирования остаточного ресурса автомобилей с использованием статистических методов.

При обосновании оптимального уровня надежности широкое применение в настоящее время находят технико-экономические методы, в основе которых лежит критерий экономической эффективности использования машины по назначению. Оптимальный уровень надежности в соответствии с этим критерием находится по минимуму суммарных удельных приведенных затрат $C_{уд}(t)$ на приобретение и эксплуатацию машин (в руб. на единицу наработки t):

$$C_{уд}(t) = C_{пр}(t) + C_{э}(t), \quad (1.1)$$

где $C_{пр}(t)$ – удельные приведенные затраты на приобретение машины; $C_{э}(t)$ – средние удельные затраты на эксплуатацию машины.

Удельные приведенные затраты на приобретение машины, включающие в себя проектирование, испытания, производство, транспортировку и др., определяются соотношением ее цены C и ресурса $T_э$:

$$C_{пр}(t) = C / T_э. \quad (1.2)$$

Средние удельные затраты на эксплуатацию машину, связанные с поддержанием машины в работоспособном состоянии и расходами на эксплуатационные материалы за ресурс $T_э$, определяются выражением:

$$C_{э}(t) = \frac{C_{то} + C_{тр} + C_{эм} + C_{зч} + C_{от}}{T_э}, \quad (1.3)$$

где $C_{то}$, $C_{тр}$, $C_{эм}$, $C_{зч}$, $C_{от}$ – затраты на ТО, ТР, эксплуатационные материалы, запасные части и оплату труда производственных рабочих.

В рассматриваемой структуре затрат особо следует выделить затраты, непосредственно связанные с надежностью машин. Это связано с тем, что в общих эксплуатационных расходах на содержание машин преобладают потери материальных ресурсов из-за недостаточного уровня их надежности. Од-

нако увеличение уровня надежности требует дополнительных капитальных вложений в производство машин, что отражается на росте цен и, соответственно, на увеличении удельных приведенных затрат на их приобретение $C_{пр}(t)$.

С другой стороны при недостаточных затратах на создание машины трудно обеспечить ее хорошую конструкторскую разработку и качественное изготовление, а следовательно и высокие показатели надежности. Поэтому при низком уровне надежности создаваемой машины существенно увеличиваются удельные затраты на ее эксплуатацию $C_э(t)$.

Схематично теоретическая модель зависимости удельных приведенных затрат от уровня надежности представлена на рис.1.1.

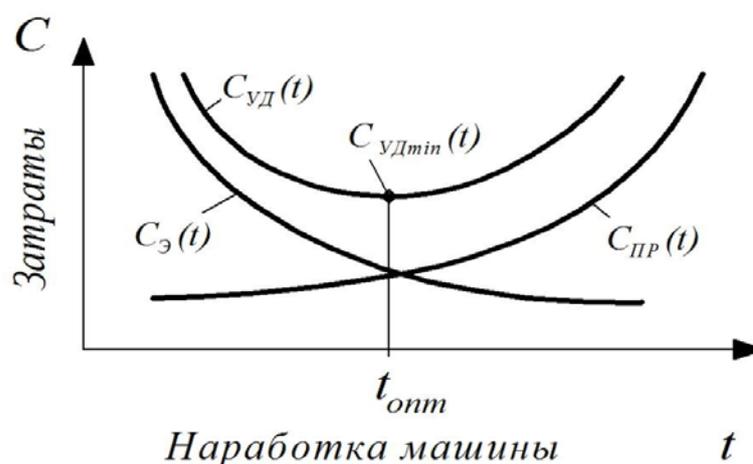


Рис. 1.1. Схема обоснования оптимального уровня надежности машины

Таким образом с увеличением уровня надежности машины удельные приведенные затраты, связанные с приобретением машины $C_{пр}(t)$ растут, так как требуют дополнительных капиталовложений. Но при этом средние приведенные затраты на ее эксплуатацию $C_э(t)$, наоборот, имеют тенденцию к снижению. В связи с этим кривая суммарных удельных приведенных затрат $C_{уд}(t) = C_{пр}(t) + C_э(t)$ имеет на какой-то наработке минимум, который и соответствует оптимальному уровню надежности

$$C_{уд}(t) = \min [C_{пр}(t) + C_э(t)]. \quad (1.4)$$

Однако отыскание оптимального уровня надежности на стадии проектирования машины является достаточно сложной задачей, связанной с необходимостью определения зависимости между затратами на повышение

надежности всех основных элементов машины и тем эффектом, который может быть получен за счет сокращения расходов на ее эксплуатацию.

Решение задачи упрощается при наличии прототипа машины, характеристики надежности которой, а также условия эксплуатации известны. В этом случае общую задачу повышения надежности машины разбивают на отдельные этапы нахождения минимальных удельных затрат для каждого планируемого мероприятия.

Повышение уровня надежности машин достигается различными методами (созданием необходимых условий для оптимальных температурных режимов работы деталей, резервированием элементов и систем, рациональным выбором материалов пар трения, повышением точности изготовления, внедрением новых упрочняющих технологий и т.д.). При оценке эффективности этих мероприятий необходимо проанализировать необходимые затраты на их проведение и последующие расходы на эксплуатацию. Решение о целесообразности проведения тех или иных технических решений, направленных на повышение надежности, следует принимать по критерию минимальных удельных приведенных затрат.

Для производителя в условиях конкурентных взаимоотношений важно выпускать машины, уровень надежности которых соответствует минимальным суммарным приведенным затратам, так как удешевление машин приводит к росту эксплуатационных расходов на поддержании их в работоспособном состоянии, удорожание – к росту удельных приведенных затрат на их приобретение.