

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

Институт Машиностроения и автомобильного транспорта

Кафедра Автомобильного транспорта

**Учебно-методический комплекс
ДИСЦИПЛИНЫ**

Эксплуатационная надежность колесных транспортных машин

(наименование дисциплины)

Направление подготовки - 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»

Программа подготовки - Надежность автотранспортных средств в эксплуатации

Уровень высшего образования - магистратура

Форма обучения - очная

Владимир 2015 г.

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

Институт Машиностроения и автомобильного транспорта

Кафедра Автомобильного транспорта

Баженов Юрий Васильевич

Конспект лекций

по дисциплине **«Эксплуатационная надежность колесных транспортных машин»** для
студентов ВлГУ, обучающихся по направлению **23.04.03 «Эксплуатация транспортно-
технологических машин и комплексов»**

Владимир 2015 г.

Введение.

Повышение надежности машин всегда являлось одной из важнейших задач машиностроения. Актуальна эта задача и для отечественного автостроения, которое должно обеспечивать транспортный комплекс страны надежно работающим подвижным составом.

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.

Для современных автотранспортных средств характерны такие направления развития, как повышение скорости и интенсивности их движения, грузоподъемности и вместимости, динамичности, мощности, топливной экономичности, безопасности движения и т.д. Усложнение автомобилей и усиление требований к ним привели к тому, что проблема повышения их эксплуатационной надежности приобрела огромное значение. ненадежный автомобиль не сможет эффективно функционировать, так как каждый его отказ влечет за собой значительные материальные потери, а в отдельных случаях может иметь и катастрофические последствия.

Анализ характера и причин отказов базируется на глубоких знаниях физической природы их возникновения и развития, т.е. знаний инженерно-физических основ надежности. Процессы, приводящие к потере машиной работоспособного состояния, включают в себя изнашивание, усталостное разрушение конструкционных материалов, пластические деформации, коррозию, старение.

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, узла, детали, выявить слабые места в конструкции, разработать конкретные мероприятия по повышению эксплуатационной надежности и оптимизации системы поддержания автотранспортных средств в работоспособном состоянии.

Обработка информации о надежности осуществляется методами математической статистики по показателям, оценивающим как отдельные свойства надежности (безотказ-

ность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость), так и комплексными показателями, оценивающими несколько ее свойств одновременно.

Обеспечение необходимого уровня надежности является одной из основных задач технической эксплуатации автомобилей и важной составляющей общей системы обеспечения надежности. На фактические показатели надежности в этот период оказывают влияние большое число факторов (условия эксплуатации, организация ТО и ремонта, квалификация персонала, производственно-техническая база предприятия). Управление этими факторами позволяет существенно повысить долговечность и безотказность автомобилей и их агрегатов.

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

Полученные в результате изучения базовых основ эксплуатационной надежности колесных транспортных машин знания существенно повысят квалификацию и компетенции магистрантов в области развития автотранспортного комплекса страны, позволят более качественно определять перспективные направления деятельности предприятий и организаций автомобильного транспорта, формировать и реализовывать научные направления в сфере эксплуатации АТС.

Дисциплина «*Эксплуатационная надежность колесных транспортных машин*» изучается в контексте современного состояния науки о надежности, поэтому преподавание указанной дисциплины включает использование всего многообразия форм получения информации и базируется на таких отраслях знаний, как «математические методы теории надёжности» и «физике отказов».

В связи с тем, что процессы, вызывающие отказы, подчиняясь определенным физическим закономерностям, имеют стохастическую (вероятностную) природу, их взаимосвязь с изменением выходных параметров машины довольно сложная. Поэтому **математические методы надёжности** основываются на теории вероятностей и математической статистике, а также смежных с ними дисциплин.

Второй теоретической основой науки о надёжности являются результаты исследования естественных наук, изучающих физико-химические процессы разрушения, старения и изменения свойств материалов, из которых изготовлены машины, или которые необходимы для их функционирования (топливо, смазки и другие материалы). Сюда относятся отрасли знаний, изучающие процессы механического разрушения материалов (сопротивление материалов), изменения в материалах и поверхностных слоях деталей (физико-химическая механика, триботехника), химические процессы (коррозия, старение) и др. Результаты этих наук в теории надёжности сконцентрированы в области, которая носит название «физика отказов».

Лекция 1. Общие понятия науки о надежности машин

Научно – технический прогресс предъявляет все более высокие требования к надежности продукции машиностроения. Решение этой важнейшей задачи не только обеспечивает высокий уровень безотказности и долговечности машин, но и является одним из основных источников повышения эффективности их использования, экономии трудовых, материальных и энергетических ресурсов, повышения конкурентоспособности.

Особенностью проблемы надёжности является её связь со всеми этапами проектирования, изготовления и эксплуатации машины, начиная с момента, когда формируется и обосновывается идея её создания и заканчивая принятием решения о списании.

Вопросы, решаемые наукой о надежности, имеют свои специфические особенности:

- во-первых, закономерности изменения начальных параметров машины, возникновения в ней отказов исследуются в зависимости от наработки (во времени);
- во-вторых, прогнозирование уровня работоспособности машины, сохранение ее выходных параметров осуществляется в зависимости от реальных условий эксплуатации.

1.1. Термины и определения в теории надежности

Каждое техническое устройство, в том числе и автомобиль, характеризуется определенными выходными параметрами, т.е. величинами, определяющими показатели качества. Эти параметры могут характеризовать самые разнообразные свойства машины в зависимости от её назначения и тех требований, которые к ней предъявляются.

В соответствии с ГОСТ 15467-79 под **качеством машин** (изделий) понимается совокупность свойств, обуславливающих пригодность изделия для выполнения его функционального назначения. Применительно к автомобилям основными свойствами, характеризующими их качество, являются: надежность, грузоподъемность, маневренность, безопасность, динамичность, производительность, топливная экономичность и др. Эти свойства закладываются при проектировании автомобиля, обеспечиваются при его производстве и реализуются в процессе эксплуатации.

Важнейшим свойством любого изделия, позволяющим количественно оценить изменение показателей качества во времени, является надёжность.

Надёжность - это свойство любого изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования (ГОСТ 27.002-89).

В современной литературе даны и более простые формулировки понятия надежности. Под *надежностью 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.

1.2. Классификация объектов и их состояний

В теории надежности термин «**объект**» используется в качестве наиболее общего наименования изделия определенного целевого назначения. Объектами автомобиля могут быть агрегаты, системы, узлы, отдельные сборочные единицы, т.е. его конструктивные элементы. Объектом является и сам автомобиль.

В зависимости от того, предусмотрены или не предусмотрены нормативно – технической документацией для данного изделия операции технического обслуживания или ремонта, изделия подразделяются на обслуживаемые, необслуживаемые, ремонтируемые и неремонтируемые. В соответствии с возможностью восстановления утраченной в процессе эксплуатации работоспособного состояния изделия подразделяются на восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Восстанавливаемыми называют такие изделия, для которых восстановление работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации. Такие изделия после проведения необходимых ремонтных операций продолжают выполнять свои функции. Типичными примерами восстанавливаемых объектов являются двигатели внутреннего сгорания, коробки передач, сцепления и другие механизмы автомобиля.

Невосстанавливаемыми называют изделия, для которых при потере работоспособности проведение ремонтных работ не предусмотрено нормативно-технической документацией. Такие изделия подлежат замене после первого отказа. Примерами таких изделий являются электронные приборы в системах управления современного автомобиля, подшипники качения, тормозные колодки и др.

Большинство объектов автостроения (автомобили, агрегаты, системы) относятся к восстанавливаемым. При этом, если при ремонте объекта, двигателя например, отказавшие элементы заменяются на новые (топливные форсунки, свечи зажигания и т.п.), то двигатель является восстанавливаемым объектом, а заменяемые отказавшие элементы – невосстанавливаемыми.

Эксплуатационные показатели машины по мере увеличения наработки изменяются от начальных до предельных значений, когда ее дальнейшая эксплуатация по техническим, экономическим, экологическим или другим причинам недопустима. Соответственно изменяется и техническое состояние объекта.

Различают следующие пять основных видов технического состояния автомобилей: исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное, предельное.

Исправное состояние – это нормальное и естественное состояние автомобиля, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документации (НТД). Исправное состояние является наиболее продолжительным в жизненном цикле автомобиля и нормальным с позиции эксплуатации.

Состояние автомобиля, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований НТД, называется **неисправным состоянием** (неисправностью). Переход автомобиля из исправного состояния в неисправное происходит вследствие какого-либо повреждения, при этом его работоспособность сохраняется.

Работоспособный автомобиль в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное использование объекта по назначению.

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

Понятие “исправность” шире, чем понятие “работоспособность”. Исправный объект, как правило, работоспособен. Работоспособный объект может быть и “неисправным”, когда возможные повреждения не влияют на его функционирование (например, помято крыло, отслоилась краска, увеличились зазоры и т.п.).

Предельным называется состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Невозможность дальнейшего применения объекта может являться следствием неустранимого нарушения требований безопасности, неустранимого ухода заданных параметров (параметра) за установленные пределы, неустранимого снижения эффективности эксплуатации, необходимостью капитального ремонта.

1.3. Отказы машин 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.

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

Таблица. Классификация отказов

| Классификационный признак | Вид отказа |
|-------------------------------------|--|
| Источник и причина возникновения | Конструктивный Производственный Эксплуатационный Деградационный |
| Характер изменения параметра техни- | Постепенный |

| | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| ческого состояния | Внезапный |
| Наличие внешнего проявления | Явный Скрытый |
| Взаимосвязь между отказами | Зависимый Независимый |
| Последствия отказа | Функционирования Параметрический |

1.4. Свойства надёжности машин

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.

Безотказность характеризует свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Это свойство определяет непрерывную работу объекта без каких-либо вмешательств, направленных на поддержания его работоспособности, т.е. технических обслуживаний и ремонтов.

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 и учитывает, что его длительная работа невозможна без проведения необходимых профилактических мероприятий и ремонтных.

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. Сохраняемостью определяются целесообразные сроки хранения и консервации автомобилей, а также допустимые расстояния транспортирования, после которых они остаются пригодными для дальнейшей эксплуатации без ремонта.

2. Количественные показатели для оценки надёжности

Показатели надёжности количественно характеризуют, в какой степени конкретному изделию присущи определённые свойства, обуславливающие его надёжность

2.1. Показатели безотказности

Для количественной оценки безотказности технических систем используются следующие показатели:

- вероятность безотказной работы;
- средняя наработка на отказ;
- средняя наработка до отказа;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов.

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникнет. Значение вероятности безотказной работы $P(t)$, как и всякой вероятности, находится в пределах

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

Физический смысл $P(t)$ заключается в следующем. Если $P(t)$ какого-либо изделия (автомобиля, например) наработке $t = 0 - 50$ тыс.км равна 0,95, это означает, что из большого их количества в среднем около 5% потеряют свою работоспособность на этой наработке. Остальные же 95% не будут иметь ни одного отказа.

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 :

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

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

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

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.

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.

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

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

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

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

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

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

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 .

2.2. Показатели долговечности

Для оценки долговечности технических систем 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.

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 $f(t)$

2.3. Показатели ремонтпригодности

Для оценки ремонтпригодности изделий служат следующие основные показатели:

- вероятность восстановления;
- среднее время восстановления;
- средняя трудоемкость восстановления.

Вероятность восстановления – это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта t_B не превысит заданное нормативной документацией значение t_H , т.е. $P(t_B) \leq P(t_H)$.

Среднее время восстановления это математическое ожидание времени восстановления работоспособности изделия, вызванное отказом

$$\bar{t}_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i,$$

где t_i – время восстановления i -го отказа; m – число отказов изделия за определенную наработку

Средняя трудоемкость восстановления представляет собой математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

2.4. Комплексные показатели надежности

Кроме рассмотренных выше показателей, характеризующих одно из свойств надежности и называемых единичными, применяются и комплексные показатели, оценивающие несколько свойств надежности одновременно. К ним относятся коэффициенты готовности и технического использования.

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

$$K_G = \frac{\sum t_{pc}}{\sum t_{\Sigma}} = \frac{\sum t_{pc}}{\sum t_{pc} + \sum t_p},$$

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

Коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ 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:

$$K_{ТИ} = \frac{\sum t_{pc}}{\sum t_{pc} + \sum t_p + \sum t_{то}},$$

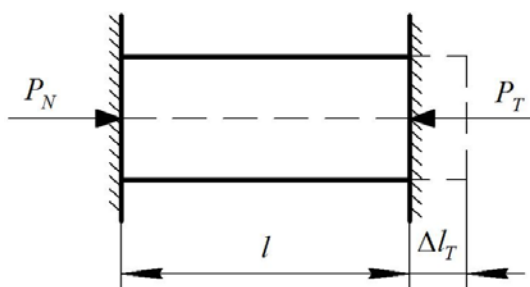
где $\sum t_{то}$ – суммарное время нахождения объекта в ТО.

Лекция 2. Причины изменения состояния машин в эксплуатации

2.1. Процессы изменения состояния конструктивных элементов машин

Механические процессы возникают в машине в результате преобразования потребляемых источников энергии и воздействуют на ее конструктивные элементы машины в виде силовых нагрузок. При движении сопряженных деталей, находящихся под воздействием силовых механических нагрузок, в зонах их контакта возникает сопротивление перемещению – **трение**. Результатом взаимодействия сопряженных деталей при трении является их изнашивание, проявляющееся в виде отделения или деформации материала с поверхностей контактирующих деталей.

Тепловые процессы возникают в конструктивных элементах технических систем при больших температурных воздействиях. Это характерно, например, для деталей двигателя внутреннего сгорания, который является основным источником механической энергии транспортных средств. Механизм образования напряжения при тепловом нагружении детали представлен схемой рис.



В случае, когда конструктивный элемент свободен (не ограничен возможностью деформирования), при нагревании в результате тепловой деформации он удлинился бы на величину

$$\Delta l_T = k_T \Delta T l,$$

где k_T – коэффициент линейного расширения материала конструктивного элемента; ΔT – перепад температур при нагревании; l - первоначальная длина конструктивного элемента.

При ограничении деформирования сечение конструктивного элемента не имеет возможности перемещаться. Ограничение перемещения равносильно тому, что к элементу приложили сжимающее усилие P_T , которое сжало бы его на величину Δl_T . Однако, в связи с невозможностью перемещаться ни вправо, ни влево перемещение $\Delta l_T = 0$.

Возникающее в результате теплового воздействия напряжение σ_n определяется из выражении

$$\sigma_n = k_m E \Delta T,$$

где E – модуль продольной упругости материала элемента

Химические процессы наблюдаются при взаимодействии материалов конструктивных элементов машин с агрессивными компонентами внешней среды (влажностью, температурой окружающего воздуха, химически активными компонентами и др.). Такое взаимодействие вызывает коррозионное разрушение, характерное для большого количества металлических деталей машин.

Электрические процессы протекают, прежде всего, в машинах, оборудованных электрическими и электронными системами управления их работой. Функционирование автомобилей, например, невозможно без электрического тока, источником которого является аккумуляторная батарея, для постоянной зарядки которой и питания всех потребителей электрической энергией при движении, служит генератор.

2.2. Эксплуатационное нагружение деталей машин

Под **нагружением** понимается процесс воздействия нагрузок на конструктивные элементы машины в процессе эксплуатации. Если на изделие действует нагрузка или несколько нагрузок одновременно, считается, что оно нагружено, т.е. функционирует под нагружением. Для деталей машин наиболее типичными видами действующих на них нагружений являются: силовое, в том числе и обусловленное трением сопряженных деталей; тепловое и коррозионное.

Под **силовой нагрузкой** понимают воздействие в процессе эксплуатации на конструктивный элемент внешней сосредоточенной или распределенной силы, которая вызывает в материале соответствующее противодействие (внутренние силы сопротивления). В число внешних сил входят и силы реакции связей, которые обеспечивают равновесное состояние системы. Внешним проявлением силового нагружения в зависимости от характера прилагаемого воздействия является изменение формы детали, т.е. ее деформация (растяжение, изгиб, кручение и др.).

Количественной оценкой силового нагружения служит **напряжение нагружения**, величина которого определяется отношением внутренних сил, возникающих в сечении элемента, к площади этого сечения

$$\sigma_n = \frac{P_B}{F}, \quad (2.4)$$

где P_B – внутренняя сила сопротивления в сечении элемента конструкции; F – площадь сечения элемента.

Таким образом, как следует из приведенной формулы, величина расчетного напряжения не зависит от материала детали, а зависит только от действующих на нее нагрузок и размеров поперечного сечения.

Напряжение измеряется в единицах силы, отнесенных к единице площади. В международной системе единиц (СИ) за единицу напряжения принят *паскаль* (Па) – напряжение, при котором на площадь сечения $F = 1 \text{ м}^2$ действует внутренняя сила $P_v = 1$ ньютона (Н). В связи с тем, что эта единица измерения является весьма малой величиной, чаще при расчетах используется мегапаскаль ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$).

В зависимости от характера изменения этих сил во времени различают два режима силового нагружения элементов конструкций: статический и динамический [25].

При **статическом режиме** элементы конструкции работают в таких условиях, когда действующая на них эксплуатационная нагрузка не изменяется во времени. При таком режиме напряжение нагружения сохраняется постоянным во времени и определяется по формуле

$$\sigma_H = \varphi_D \cdot \frac{\bar{P}}{F}, \quad (2.5)$$

где φ_D – коэффициент деформации, зависящий от схемы силового нагружения и формы поперечного сечения детали; \bar{P} – математическое ожидание внешней силы, действующей на деталь; F – площадь поперечного сечения детали.

При **динамическом режиме нагружения** действующая на конструктивный элемент нагрузка изменяется во времени. Такой вид нагружения обусловлен следующими основными причинами:

- колебательным характером механических процессов при работе двигателей, гидравлических насосов, компрессоров и т.д.;
- динамическим характером работы транспортных машин (трогание с места, разгон, торможение, остановка);
- неблагоприятными дорожными условиями, вызывающими динамические нагрузки на агрегаты, механизмы, конструктивные элементы машин;
- возникновением вибрационных нагрузок, возрастающих с ухудшением технического состояния машин в процессе эксплуатации и др.

При динамическом режиме напряжение нагружения определяется выражением

$$\sigma_H(t) = \varphi_D \cdot \frac{P(t)}{F(t)}, \quad (2.6)$$

где $P(t)$, $F(t)$ – значение нагружающей силы и площадь поперечного сечения конструктивного элемента, изменяющиеся во времени.

Таким образом, в отличие от статического напряжение при динамическом режиме нагружения $\sigma_H(t)$ является функцией времени эксплуатации изделия. При этом изменяется не только величина нагружения, но и площадь поперечного сечения детали, которая происходит из-за изнашивания, коррозионного разрушения металла и других факторов.

Различают два вида динамического нагружения: ударное и циклическое (колебательное).

Под ударом понимается механическое взаимодействие элементов конструкции, приводящее к изменению скоростей их точек соприкосновения за бесконечно малый промежуток времени. Этот промежуток времени, измеряемый в тысячных, а иногда и миллионных долях секунды, называется *временем удара*. В воспринимающем такую нагрузку элементе кинетическая энергия практически мгновенно превращается в динамическую, вызывая деформацию этого элемент, его перемещение или разрушение.

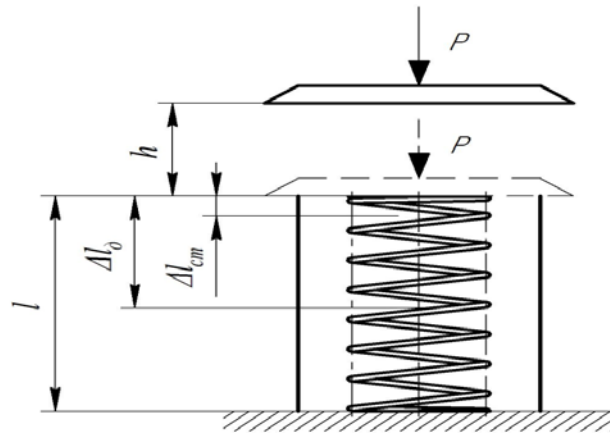


Схема ударного эксплуатационного нагружения

Циклическим (колебательным) режимом нагружения называется такое воздействие на элемент конструкции, при котором изменение силовой нагрузки носит циклический (периодический) характер.

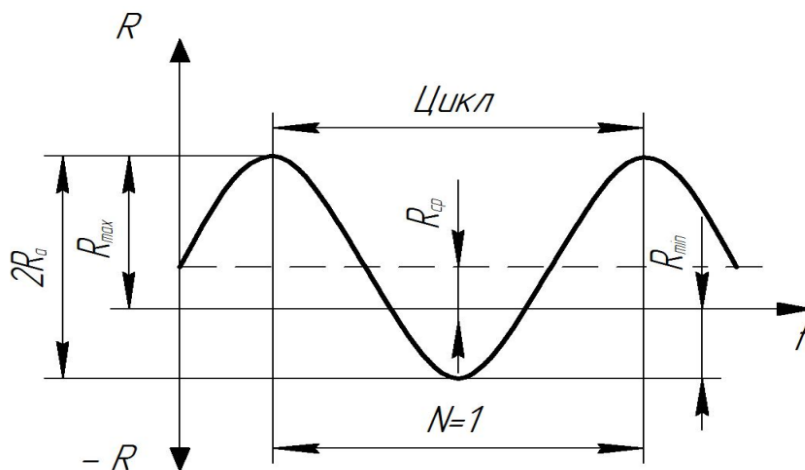


Схема циклического нагружения:

R_{\max} , R_{\min} – максимальная и минимальная амплитуды нагрузки в цикле;
 $R_{\text{ср}}$ – средняя амплитуда нагрузки в цикле; R_a – амплитуда цикла

2.3. Причины нарушения работоспособности машин

Эксплуатационные нагружения, воздействуя на элементы конструкции машин, приводят к различным видам повреждений. В начальный период эксплуатации энергия сопротивления материала превышает эксплуатационное нагружение, действующее на

конструктивный элемент, поэтому он находится в работоспособном состоянии. С увеличением наработки из-за необратимых изменений в механизмах эксплуатационные нагрузки возрастают. Одновременно происходит накопление внутренних повреждений в материале детали. И в определённый момент времени, когда энергия эксплуатационного нагружения превысит энергию сопротивления материала, элемент конструкции теряет работоспособность и не может выполнять свое функциональное назначение.

В зависимости от вида нагружения в деталях автомобиля возникают различные виды эксплуатационных повреждений (усталость металла, остаточные деформации, старение, коррозия, изнашивание). Для автотранспортных средств и их конструктивных элементов процентное распределение этих повреждений приведено в табл.

Основные причины потери автомобилем работоспособности

| № пп | Наименование эксплуатационного повреждения | Процентное распределение |
|------|--|--------------------------|
| 1 | Изнашивание под воздействием сил трения | 45 - 50 |
| 2 | Пластическое деформирование | 25 - 30 |
| 3 | Усталостное разрушение | 15 - 20 |
| 4 | Коррозионное разрушение и старение | 5 - 10 |

Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Физическая сущность изнашивания заключается в том, что при относительно перемещении двух поверхностей в области их контакта возникают механические и молекулярные связи, сопровождающиеся тепловыми, окислительными и другими эффектами. Возникновение таких связей и последующий их разрыв приводят к разрушению микрообъемов поверхности и их удалению, т.е. к изнашиванию.

В процессе изнашивания исходный (технологический) рельеф поверхности детали преобразуется в эксплуатационный. При этом устанавливается та шероховатость поверхности, которая соответствует данному процессу разрушения поверхностных слоев в период нормального изнашивания.

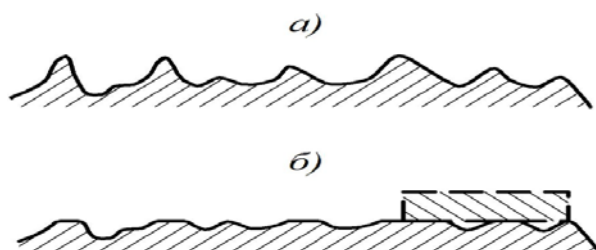


Схема преобразования технологического рельефа поверхности (а)
в эксплуатационный (б).

Пластическая деформация представляет собой необратимое изменение формы и размеров детали после снятия нагрузки. Такая деформация возникает с увеличением нагрузки на конструктивный элемент, когда в металле появляются сдвиги одних микрообъемов относительно других. Эти сдвиги необратимы и после снятия нагрузки деталь изменяет свою форму и размеры. Возникает некоторое формоизменение, которое носит название *пластического* или *остаточного деформирования*

При деформировании в материале детали возникают внутренние силы, противодействующие этому процессу. Способность материала детали выдерживать внешние силовые нагрузки без разрушения называют *прочностью*, а ее количественной мерой служит *напряжение прочности*. При этом различают:

- нормальное напряжение прочности $\sigma_H = P/F$;
- касательное напряжение прочности $\tau_H = P_S/F_S$.

Нормальное напряжения противодействуют отрыву отдельных частей материала детали, а касательное - сдвигу этих частей относительно друг от друга.

В зависимости от схемы силового нагружения в конструктивных элементах машин возникают следующие виды деформаций: растяжение (сжатие), сдвиг (срез), изгиб и кручение

| Вид деформации | Схема нагружения | Параметр нагружения | Напряжение нагружения |
|---------------------|------------------|-------------------------|------------------------------|
| Растяжение (сжатие) | | Осевая сила P_x | $\sigma_H = \frac{P_x}{F}$ |
| Сдвиг (срез) | | Поперечная сила P_s | $\tau_H = \frac{P_s}{F_s}$ |
| Изгиб | | Изгибающий момент M_x | $\sigma_H = \frac{M_x}{W_x}$ |
| Кручение | | Крутящий момент M_p | $\sigma_H = \frac{M_p}{W_p}$ |

Усталостное разрушение происходит в результате постепенного изменения физико-механических свойств в металлических деталях машин из-за многократного воздействия знакопеременных нагрузок.

Большое число деталей машин работает в режиме повторных переменных напряжений. Примером могут служить детали двигателя внутреннего сгорания (валы, шатуны, шестерни, поршни и др.), рамы, рессоры, кузова и кабины автомобилей и многие другие конструктивные элементы. Практика эксплуатации машин показывает, что материалы этих деталей разрушаются, несмотря на то, что напряжения от действия на них нагрузок не превышают предел упругости $\sigma_{уп}$.

Исследования причин такого явления показали, что при многократном действии повторных нагрузок материал детали как бы «устает», его несущая способность истощается, и он разрушается. Причиной этого является постепенное накопление пластической деформации, которое и приводит к разрушению.

Под коррозией понимается разрушение металлов вследствие их химического или электрохимического взаимодействия с коррозионной средой. В результате часть металла конструктивных элементов растворяется или переходит в ионное состояние с образованием окислов и солей. Способность металла сопротивляться коррозионному воздействию внешней среды называется *коррозионной стойкостью*.

По механизму взаимодействия материала со средой различают химическую и электрохимическую коррозию.

Химическая коррозия протекает в неэлектрических средах и заключается во взаимодействии металла с компонентами этих сред. Закономерности протекания химической коррозии те же, что и в процессе окисления металлов. На поверхности металла образуется пленка кислорода, адсорбированного или на чистой поверхности (химическая адсорбция), или молекулы кислорода закрепляются на поверхности предыдущего слоя (физическая адсорбция), или увеличивается толщина пленки окисла (реакция окисления).

Электрохимическая коррозия развивается при воздействии на металл электропроводной среды – раствора электролита.

Процесс электрохимической коррозии можно рассматривать как результат работы коррозионных гальванических элементов взаимодействия металла с электролитом (водой, водными растворами солей, кислот, расплавов солей).

Старением материалов называются процессы изменения их физико-механических свойств во времени в условиях длительного хранения. Старение, как правило, обусловлено недостаточно стабильным равновесным состоянием материала и постепенным его переходом в стабильное (равновесное) состояние.

Лекция 3. Виды и закономерности изнашивания.

3.1. Классификация видов изнашивания

В зависимости от факторов, определяющих тот или иной процесс разрушения поверхности детали при трении, все виды изнашивания разделены на три основные группы: механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое (рис.1).

Механическое изнашивание происходит только в результате механических воздействий на поверхность трения.

Абразивное изнашивание – наиболее распространенный вид изнашивания. Вызывается наличием на поверхности трения абразивных частиц, попавших с воздухом, топливом и маслом (вследствие недостаточной фильтрации), а также образовавшихся при разрушении микрообъемов трущихся поверхностей. Абразивный износ возможен и тогда, когда твердые составляющие одного из сопряженных тел оказывают режущее или царапающее воздействие на другое сопряженное тело. Этому виду изнашивания подвержены практически все детали транспортных и других машин.

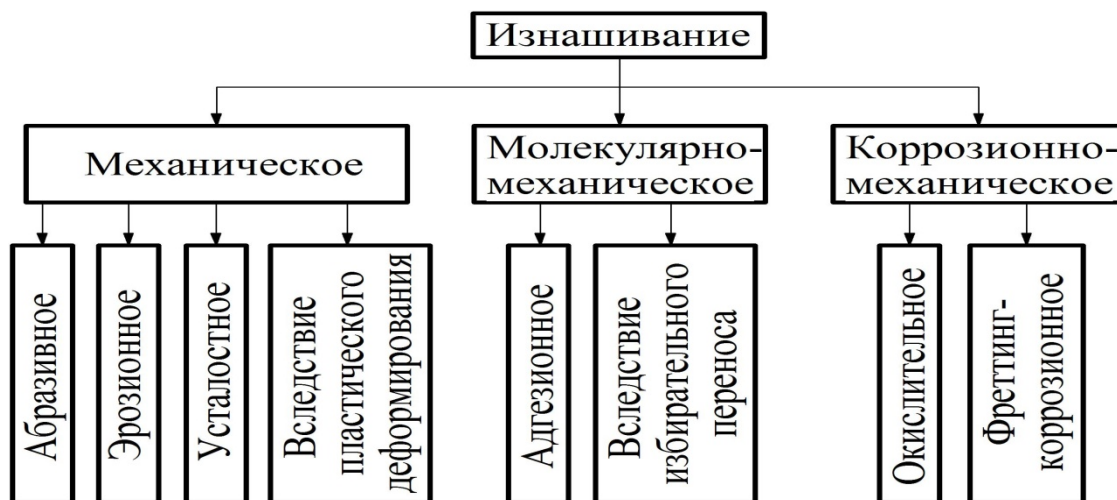


Рис.1. Виды изнашивания деталей

Эрозионное изнашивание – это изнашивание поверхности в результате механического воздействия на нее потока жидкости или газа, а также под влиянием электрических разрядов. В результате эрозионного изнашивания на поверхности трения возникают раковины, каверны, питтинги.

Усталостное изнашивание (контактная усталость) является следствием циклического воздействия на вершины микронеровностей трущихся поверхностей. Такой вид механического изнашивания характерен для большинства сопряжений машин и возникает как при трении качения, так и при трении скольжения. При чистом качении деталей друг относительно друга усталостное изнашивание проявляется в развитии очагов разрушения поверхностей в виде ямок (питтингов). При трении скольжения усталостное изнашивание происходит вследствие усталости микрообъемов материала контактирующих поверхностей.

При изнашивании вследствие **пластического деформирования** происходит изменение макрогеометрических размеров детали без потери массы под воздействием передаваемой нагрузки или под влиянием сил трения. Пластическое деформирование поверхностей происходит постепенно и сопровождается некоторым уплотнением поверхностных слоев.

Молекулярно-механическое изнашивание (изнашивание при схватывании) возникает в результате одновременного механического и атомно-молекулярного взаимодействия материалов контактирующих поверхностей деталей.

Адгезионное изнашивание связано с возникновением в локальных зонах контакта поверхностей интенсивного молекулярного взаимодействия, силы которого превосходят прочность связей материала поверхностных слоев с основным материалом. При трении металлических пар происходит схватывание (схватывание II рода) по вершинам неровностей контактирующих поверхностей и их последующее разрушение. В результате происходит вырывание частиц материала, их перенос с одной поверхности на другую и абразивное воздействие вновь образовавшихся неровностей на сопряженную деталь.

Избирательный перенос – вид молекулярно-механического изнашивания, возникающий при взаимодействии трущихся поверхностей с образованием защитной, т.н. сервоитной пленки. Такая пленка образуется в зоне трения в результате электрохимических процессов, развивающихся в парах трения: медь-сталь, бронза-сталь, алюминий-чугун и др.

Коррозионно-механическое изнашивание возникает при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие с агрессивной внешней средой. Такой средой может быть пленка влаги, в которой растворены кислород, двуокись углерода, двуокись серы, окислы азота, сероводород и другие газы, а также соли кислот и щелочей. В результате такого взаимодействия на поверхностях деталей образуются химические соединения, которые из-за их меньшей по сравнению с основным материалом прочности разрушаются и удаляются с продуктами износа.

При окислительном изнашивании кислород воздуха или содержащийся в смазке образует на поверхности металла окисную пленку, которая при трении разрушается. На обнажившихся чистых поверхностях металла вновь образуются и разрушаются пленки окислов и в него вступают новые, нижние слои металла. Продукты износа состоят из этих окислов

Изнашивание при фреттинг-коррозии – это коррозионно-механическое изнашивание контактирующих тел при их малых колебательных перемещениях при наличии в зоне

контакта окисляющей среды. На соприкасающихся поверхностях вначале возникают окисные пленки, которые при относительных колебательных перемещениях разрушаются.

3.2. Закономерности изнашивания деталей

В процессе эксплуатации машин количественные характеристики изнашивания деталей и сопряжений изменяются во времени. В общем случае изнашивание может быть представлено в виде стадийного процесса, имеющего три характерных периода (рис. 2).

В первый период $t_{п}$, период *приработки* осуществляется микро- и макрогеометрическая приработка поверхностей трения деталей. Этот период характеризуется интенсивным разрушением микрообъемов поверхности изнашивания, повышенным тепловыделением, изменением шероховатости. Для большинства конструктивных элементов современных машин продолжительность периода приработки незначительна (для автомобилей, например, она составляет 3 – 3,5% их ресурса).

К завершению периода приработки скорость изнашивания монотонно убывает до значения $\gamma = \text{const}$, характерного для периода установившегося (*нормального*) изнашивания $t_{ни}$. Если нет причин, изменяющих параметры установившегося процесса изнашивания, то он протекает стационарно, и возможные отклонения от средней скорости процесса за счет его стадийности не влияют на общую линейную зависимость износа от наработки.

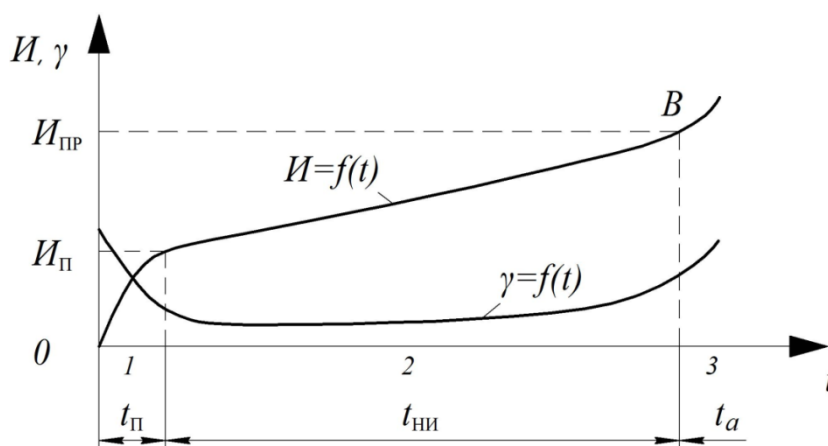


Рис. 2. Кривая изнашивания деталей машин:

$I_{п}$ -износ за период приработки; $I_{пр}$ - предельный износ; $I = f(t)$ - кривая изнашивания; $\gamma = f(t)$ - скорость изнашивания; $t_{п}$ - период приработки; $t_{ни}$ – период нормального изнашивания; t_a – период аварийного изнашивания

Третий период характеризует наступление *аварийного* изнашивания t_a , когда резко возрастает интенсивность процесса. Его наступление связано, как правило, с изменением вида изнашивания в результате активизации факторов, влияющих на процесс и зависящих от степени износа. Возникают ударные нагрузки, биение, изменение теплового режима и условий смазки. Происходит рост микронеровностей, возникают условия для схватывания и молекулярно-механического изнашивания. Интенсивность отказов резко возрастает, а вероятность безотказной работы снижается до минимума. Эксплуатация машин в этот пе-

риод становится нерентабельной из-за резкого роста затрат на поддержание их в технически исправном состоянии и даже опасной из-за недостаточной прочности деталей.

3.3. Количественные характеристики процесса изнашивания

Для оценки процесса изнашивания деталей машин используются следующие три показателя: износ, скорость изнашивания и интенсивность изнашивания.

Под износом понимается результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. В зависимости от конструктивных особенностей деталей износ может оценивать изменение под действием сил трения их геометрических размеров (линейный износ), массы (весовой износ) или объема (объемный износ), измеряемое в соответствующих единицах: метрах – м, граммах – г, кубических метрах – м³. Для транспортных машин величину износа оценивают в основном в мкм (1 мкм = 10⁻⁶ м).

Скорость изнашивания γ представляет собой отношение износа U , возникшего за определенный интервал времени t , к величине этого интервала (в часах)

$$\gamma = U/t$$

Интенсивность изнашивания J – это отношение износа U к обусловленному пути трения L , на котором он произошел. Если износ и путь трения измеряются в одинаковых единицах, то интенсивность изнашивания является безразмерной величиной

$$J = U/L$$

Изнашивание деталей происходит преимущественно в период установившегося режима эксплуатации машин (для автомобилей, например, этот период составляет 95% их ресурса). В этот период скорость изнашивания примерно постоянна, поэтому зависимость между величиной износа и наработкой является линейной

$$I = \gamma t,$$

где I – линейный износ, т.е. изменение размера детали, измеренное в направлении, перпендикулярном поверхности трения; γ – скорость изнашивания; t – наработка.

С учетом приработки эта зависимость выглядит следующим образом:

$$I = I_{\text{п}} + \gamma t,$$

где $I_{\text{п}}$ – величина износа за период приработки.

3.4. Предельные и допустимые износы

Предельное значение износа соответствует состоянию изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или экономически нецелесообразна. Такая величина износа характеризует выход изделия из области работоспособности. Это может относиться как к машине в целом, так и к ее агрегатам, узлам и деталям. Так, например,

необходимость выполнения регулировочных работ обуславливается достижением предельных зазоров в сопряжениях; замена или ремонт детали диктуется износом хотя бы одной ее рабочей поверхности до предельного значения.

Предельное состояние машины или агрегата назначается, в основном, исходя из допустимых отклонений выходного параметра на основании данных эксплуатации и ремонта. Износ, например, таких деталей, как гильзы цилиндров, поршни, поршневые кольца, коленчатый вал и другие трущиеся детали двигателей неизбежно приводит к снижению эффективной мощности и повышению удельного расхода топлива (рис.3)..

При достижении предельного износа эффективная мощность двигателя имеет минимально допустимое значение, а удельный расход топлива – максимально допустимый. Точка A' и определяет предельный износ двигателя, соответствующий $N_{e\min}$ и $g_{e\max}$. Дальнейшая работа автомобиля с таким двигателем становится нерентабельной.

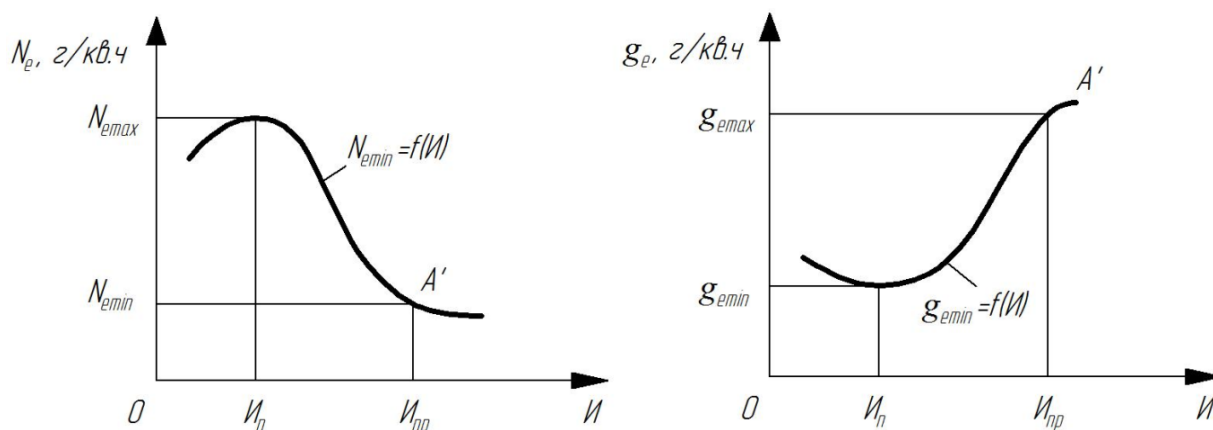


Рис. 3. Графики изменения эффективной мощности N_e и удельного расхода топлива g_e от степени износа двигателя

Таким образом, технические условия на выходные параметры различных машин и агрегатов служат основой для назначения допусков на предельные состояния для узлов и деталей, входящих в изделие

Для современных машин часто целесообразно устанавливать нормативы на предельные состояния не только по выходным параметрам, но и по степени повреждения их отдельных элементов. Так на целый ряд деталей и агрегатов автомобиля предельные состояния устанавливают по износу, деформациям, величине возникающих трещин, изменениям геометрической формы и т.д.

Допустимый – это такой износ изделия, при котором оно не может выйти из строя в течение очередного межремонтного периода. Его значение может быть установлено при известной кривой изнашивания и установленного норматива предельного износа детали. Нарботка детали до предельного состояния $t_{пр}$ определяется по формуле

$$t_{пр} = I_{пр} / \gamma,$$

где $I_{пр}$ – предельное значение износа; γ – скорость изнашивания.

За время межремонтного периода $t_{\text{мр}}$ износ детали изменится на величину

$$I_{\text{мр}} = \gamma \cdot t_{\text{мр}}$$

Допустимое значение износа $I_{\text{доп}}$, начиная с которого необходимо восстанавливать или заменять деталь, при известной межремонтной наработке $t_{\text{мр}}$ будет равно

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{пр}} - \gamma t_{\text{мр}}.$$

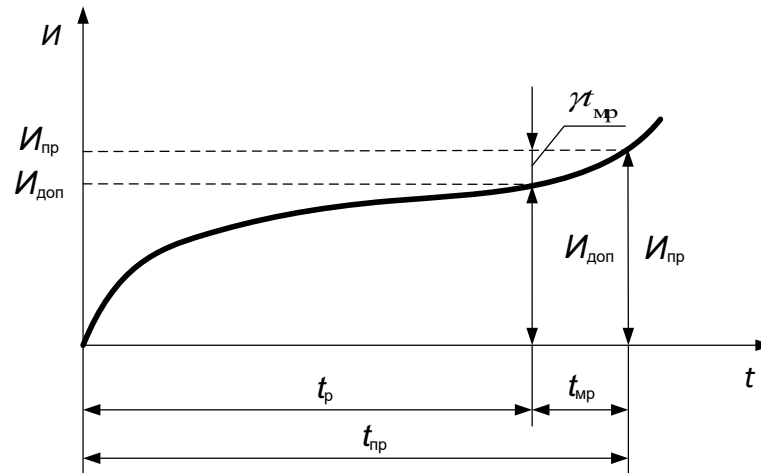


Рис. 3.9. Схема определения допустимого износа

Лекция 4. Основные факторы, определяющие интенсивность изнашивания

4.1. Влияние на изнашивание давления и скорости относительного перемещения

Давление на поверхность трения и скорость относительного скольжения являются основными параметрами, связанными с конструкцией и кинематикой сопряжения. Изучение процесса изнашивания различных материалов в условиях граничного и близких к нему видов трения показывает, что в общем случае скорость изнашивания выражается зависимостью

$$\gamma = k P^m v^n,$$

где k – коэффициент, характеризующий износостойкость материалов пары трения и условия в зоне контакта (смазка, степень загрязнения, температура и др.); P – давление на поверхность трения; v – скорость относительного скольжения; m и n – постоянные, зависящие от вида трения.

4.2. Влияние на изнашивание температуры поверхности трения

В процессе работы сопряжений выделяемая при трении теплота частично расходуется на нагрев материала деталей, а частично поглощается окружающей средой. Экспериментально установлено, что увеличение температуры поверхности трения Δt пропорционально приращению количества теплоты ΔQ , приходящуюся на единицу поверхности детали

$$\Delta t = c \Delta Q,$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Зависимость интенсивности изнашивания от температуры является довольно сложной. При инженерных расчетах с достаточной для практических целей точностью для граничного и близких к нему видов трения ее можно принять линейной :

$$\gamma = \gamma_0 + b \Delta t,$$

где Δt – изменение температуры поверхности детали при трении; b – коэффициент пропорциональности; γ_0 – интенсивность изнашивания при $\Delta t = 0$.

Для поверхностей, смазываемых под давлением, зависимость интенсивности изнашивания с изменением температуры (например, масла в картере двигателя) Δt_1 отличается от линейной:

$$\gamma = \gamma_0 - b\Delta t_1 + c(\Delta t_1)^2,$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Существует оптимальная температура масла, при которой интенсивность изнашивания смазываемых конструктивных элементов минимальна (рис. 4.1). При большем или меньшем ее значении интенсивность изнашивания возрастает.

При пониженных температурах деталей цилиндропоршневой группы интенсифицируются процессы коррозионно-механического изнашивания, так как на поверхностях конденсируются пары воды и кислот, образующихся в отработавших газах. В дальнейшем образовавшиеся пленки оксидов быстро разрушаются, так как их износостойкость на порядок ниже износостойкости материалов деталей двигателя. Кроме того, увеличение интенсивности изнашивания происходит вследствие того, что холодные моторные масла не образуют на трущихся поверхностях качественных масляных пленок.

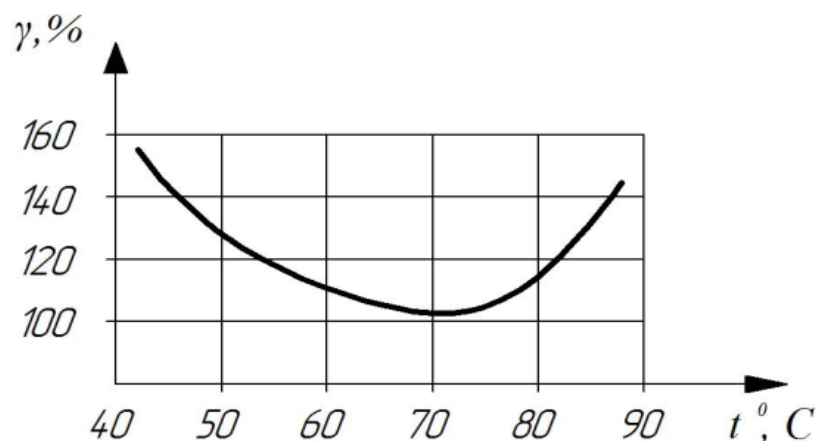


Рис.4.1. Изменение интенсивности изнашивания цилиндров двигателя (расстояние 8 мм от верхней плоскости блока) в зависимости от температуры масла в картере t

Интенсивность изнашивания резко возрастает и с ростом температуры масла. Это происходит из-за того, что при высоких температурах ослабевают молекулярные связи в масле, нарушается их адсорбция на поверхность трения, в результате чего резко ухудшаются смазочные свойства.

4.3. Зависимость интенсивности изнашивания от вида трения

В зависимости от состояния поверхностей трущихся элементов и наличия смазки различают следующие виды трения скольжения (рис. 4.2):

- сухое, когда между поверхностями отсутствует смазка и загрязнение поверхностей;
- граничное, возникающее при условии разделения трущихся поверхностей чрезвычайно тонким слоем смазки, не обладающим свойствами жидкости;

- жидкостное, когда рабочие поверхности полностью разделены слоем смазки. создаются условия для возникновения молекулярного взаимодействия и таких

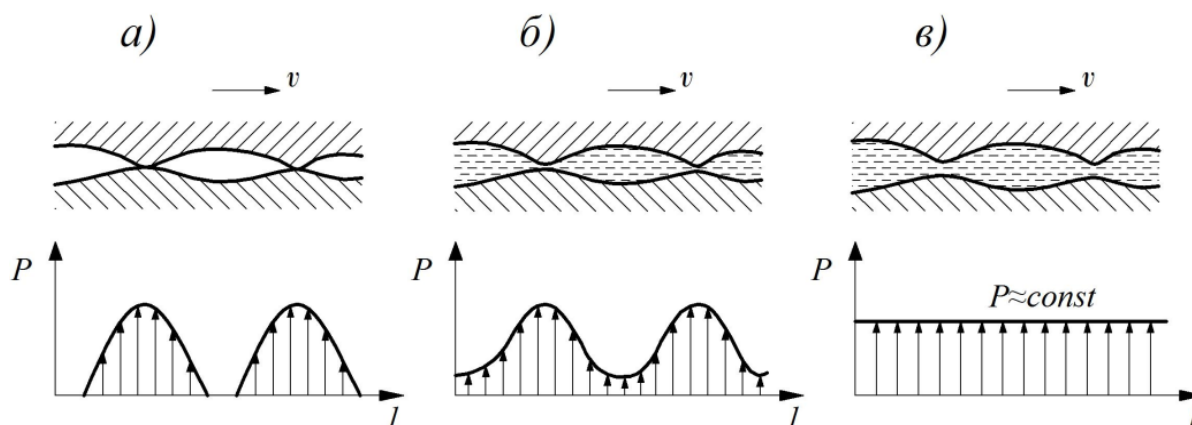


Рис. 4.2. Схематичное изображение основных видов трения:
 а – сухое; б – граничное; в – жидкостное

При **сухом трении** имеет место наибольшая скорость изнашивания, так как здесь явлений, как повышение температуры, концентрация давления P на отдельных участках, что интенсифицирует процесс разрушения поверхностных слоев. При **жидкостном трении** рабочие поверхности сопряженных деталей разделены слоем жидкостного смазочного материала, находящегося под давлением. Слой смазки уравнивает внешнюю нагрузку на поверхность трения и является при таком виде трения несущим.

Коэффициент трения при жидкостном контакте поверхностей выражается соотношением

$$f = \frac{k \cdot \eta \cdot v}{P},$$

где k – коэффициент пропорциональности; η – динамическая вязкость смазочного материала; v – скорость скольжения; P – нормальная нагрузка (давление на поверхность трения).

Жидкостное трение – наиболее желательный вид трения с точки зрения предотвращения износа, потерь энергии, долговечности деталей. Оно наблюдается в подшипниках коленчатого вала двигателя в период установившегося режима работы.

На практике при работе механизмов и узлов машин наблюдаются смешанные или промежуточные виды трения (полужидкостное, полусухое и т.д.). Полужидкостная смазка, например, характерна для большинства зубчатых передач и подшипников качения.

4.4. Влияние на изнашивание смазочных материалов

Интенсивность изнашивания деталей машин во многом зависит от качества используемых смазочных материалов. От современных масел, применяемых в автомобилях, дорожно-строительных и других машинах требуется, во-первых, создание прочной поверхностной оксидной пленки, обладающей повышенной износостойкостью, и, во-вторых, устранение механического взаимодействия трущихся поверхностей деталей.

Смазочные материалы, как и металлы, из которых изготовлена машина, относятся к конструкционным материалам, в связи с чем к ним применимы все понятия и определе-

ния теории надежности. Они должны сохранять свои эксплуатационные свойства во времени или наработке в заданных условиях эксплуатации, поэтому от их правильного выбора и качества во многом зависит срок службы или ресурс любой машины.

Смазочные масла выполняют следующие функции:

- снижают трение, возникающее между сопряженными поверхностями деталей;
- предотвращают атомно-молекулярное взаимодействие материалов поверхностных слоев;
- защищают детали от коррозионного воздействия внешней среды;
- отводят тепло из зоны контакта;
- обеспечивают вынос продуктов изнашивания и коррозионного разрушения из зоны трения для последующей их фильтрации.

4.5. Зависимость интенсивности изнашивания от механических характеристик и структуры материалов деталей

При относительном перемещении двух поверхностей в области их контакта возникают механические и молекулярные связи, сопровождающиеся тепловыми, окислительными и другими эффектами. Разрыв этих связей вызывает разрушение микровыступов поверхностного слоя и их удалению, т.е. к изнашиванию. Поэтому все прочностные характеристики материалов (предел прочности, предел упругости и т.д.) играют определенную роль в каждом элементарном акте разрушения.

В наибольшей степени из всех механических характеристик на износостойкость металлов (способность сопротивляться разрушению поверхности детали при трении) оказывает влияние их твердость.

Твердостью называется свойство материала сопротивляться пластической деформации при вдавливании в его поверхность твердого тела (индентора). Для чистых металлов и термически необработанных сталей зависимость между твердостью и относительной износостойкостью определяется выражением:

$$\varepsilon = bH,$$

где ε – относительная износостойкость, т.е. отношение износа эталонного материала к износу испытуемого; b – коэффициент пропорциональности; H – твердость по Виккерсу.

Для термически обработанных деталей износостойкость также возрастает с увеличением твердости, но в меньшей степени, и выражается соотношением:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b'(H - H_0),$$

где ε_0 – относительная износостойкость стали в отожженном состоянии; b' – коэффициент пропорциональности, имеющий разную величину для сталей разного химического состава; H – твердость термически обработанной стали; H_0 – твердость стали в отожженном состоянии.

4.6. Влияние на изнашивание качества поверхности детали

Разрушение деталей, и прежде всего изнашивание, в большинстве случаев начинается с поверхности, так как поверхностные слои наиболее нагружены и подвержены воздействию внешней среды. Поэтому качество поверхностного слоя оказывает большое влияние на износостойкость детали.

Качество поверхности детали характеризуется физическими и геометрическими параметрами. Физические параметры поверхности (химический состав, структура и твердость поверхностного слоя, остаточные напряжения в нем) рассмотрены в предыдущем разделе. К важнейшим геометрическим параметрам качества поверхности относятся: макрогеометрия и шероховатость.

Макрогеометрия характеризует различные отклонения формы реальной поверхности детали от номинальной, т.е. формы, заданной чертежом. К ним, прежде всего, относятся отклонения от прямолинейности, плоскостности, круглости, профиля продольного сечения и цилиндричности. Для цилиндрических поверхностей деталей наиболее характерными являются отклонения от круглости и профиля продольного сечения (рис. 4.3).

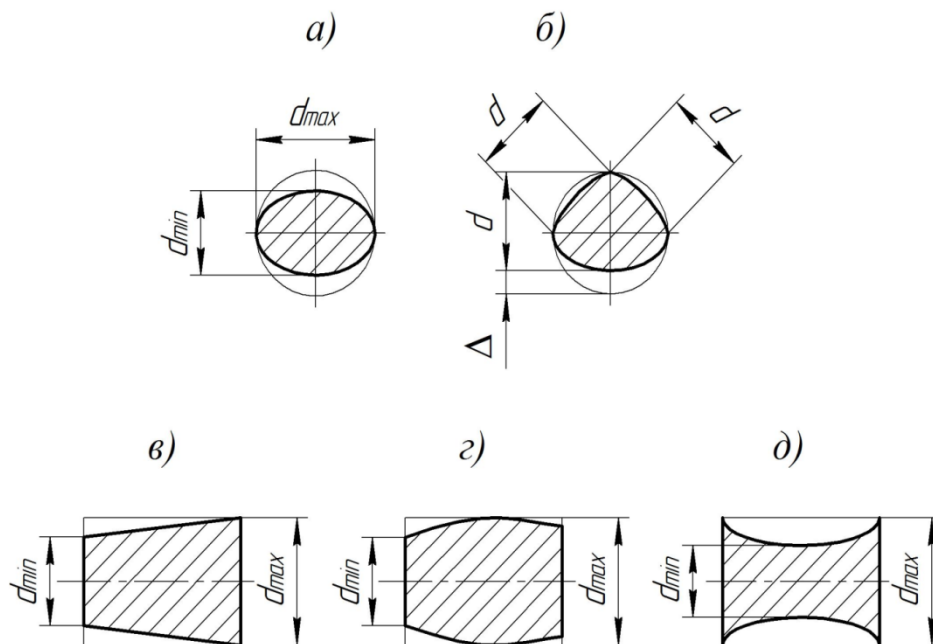


Рис.4.3. Отклонение формы цилиндрических поверхностей:
 а – овальность; б – огранка; в – конусообразность; г - бочкообразность;
 д – седлообразность

Шероховатостью поверхности называется совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами в пределах базовой длины.

Шероховатость рабочих поверхностей оказывает существенное влияние на все их эксплуатационные свойства и, прежде всего, на износостойкость. Особенно большое влияние шероховатости на интенсивность изнашивания проявляется в сопряжениях с зазором на стадии приработки.

Для каждой пары трущихся деталей на установившихся после приработки режимах их работы формируется своя оптимальная «эксплуатационная» шероховатость. Поэтому

смысл этапа приработки и заключается в том, что микрогеометрия поверхностей трущихся пар переходит от начальной технологической к установившейся эксплуатационной.

Шероховатость поверхности оказывает существенное влияние и на коррозионную стойкость детали. Коррозия гораздо быстрее проникает и распространяется в рабочие поверхности с увеличением шероховатости. Процесс последующего разрушения поверхностных слоев, предварительно разрыхленных коррозией, протекает с большей интенсивностью.

В плотных и неподвижных соединениях (посадках с натягом) шероховатость также оказывает большое влияние на точность и прочность сопряжений. Чем больше шероховатость поверхностей деталей таких соединений, тем меньше их прочность.

4.7. Влияние на изнашивание условий эксплуатации

В общем случае на интенсивность изнашивания деталей транспортных машин оказывают влияние большое число факторов их реальной эксплуатации: состояние дорог, условия хранения, природно-климатические условия, эксплуатационные режимы работы, качество используемых эксплуатационных материалов и др.

Дорожные условия характеризуются технической категорией дороги, видом и качеством дорожного покрытия, а также рельефом местности. Чем ниже качество дорожного покрытия, тем выше интенсивность изнашивания поверхностей деталей. При движении автомобиля в его трущиеся агрегаты и узлы проникает дорожная пыль, основным компонентом которой являются частицы кварца. Попадая на трущиеся детали, эти частицы вызывают их абразивное изнашивание. Особенно большой вред оказывают мелкодисперсные частицы пыли, которые практически не задерживаются фильтрующими элементами.

Существенное влияние на интенсивность изменения технического состояния автомобиля оказывают температура окружающего воздуха, его влажность, интенсивность атмосферных осадков, агрессивность окружающей среды, сезонные колебания условий эксплуатации и др. По данным ряда исследований минимальное значение количества отказов элементов автомобиля происходит при температуре окружающего воздуха от -5°C до $+15^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.4).

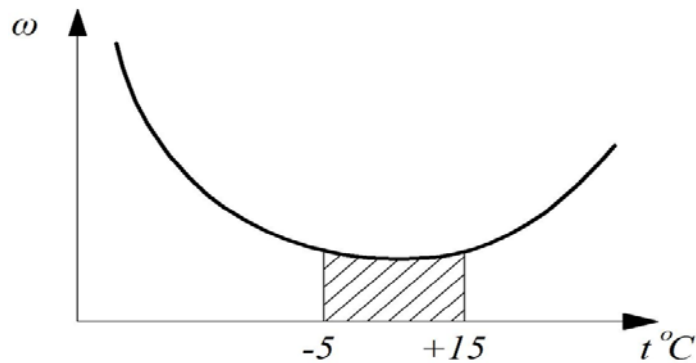


Рис. 4.4. Зависимость количества отказов автомобиля от температуры окружающего воздуха $t^{\circ}\text{C}$

Агрессивность окружающей среды связана с коррозионной активностью воздуха, что характерно при эксплуатации автомобилей в прибрежных морских районах, или при их использовании для постоянной перевозки химических грузов. Такие условия эксплуатации вызывают интенсивную коррозию деталей, сокращая нормативный ресурс автомобиля.

Интенсивность изменения технического состояния автомобиля зависит и от сезонных условий эксплуатации, вызываемых колебаниями температуры воздуха, дорожными условиями по временам года. В осенне-зимний период, например, при выпадении осадков в виде дождя и снега условия движения автомобиля ухудшаются.

Существенное влияние на интенсивность изнашивания деталей машин оказывают эксплуатационные режимы их работы. При движении автомобиля режимы его работы постоянно меняются, т.е. имеют место, так называемые, *нестационарные (неустановившиеся) режимы*. В целом эксплуатационные режимы работы автомобиля определяются комплексом скоростных, нагрузочных и тепловых режимов, обусловленных климатическими условиями, рельефом местности, качеством дорожных покрытий, квалификацией водителя и другими факторами.

По результатам статистических исследований нестационарные режимы работы при эксплуатации автомобилей составляют:

- 90 – 95 % в условиях городского интенсивного движения;
- 85 – 90 % при движении по грунтовым дорогам;
- 30 – 35 % на загородных автомагистралях.

Необходимым условием нормального изнашивания деталей является обеспечение оптимальных тепловых режимов их работы. При относительном перемещении контактирующих поверхностей в зоне трения закономерно изменяется температура, что влечет за собой изменение структуры поверхностного слоя, смазывающей способности масла, коэффициента трения и, как следствие, скорости изнашивания.

Для заданных условий эксплуатации необходимо устранить, прежде всего, нежелательные виды изнашивания (механическую форму абразивного износа, схватывание, тепловое и усталостное изнашивание), которые вызывают аварийное разрушение поверхностных слоев металла. К допустимым можно отнести только окислительную и механохимическую формы изнашивания с постепенным разрушением поверхности деталей.

Устранение абразивных процессов связано, главным образом, с очисткой среды в зоне трения от абразивных частиц, попадающих туда с воздухом через систему питания, топливом, маслом. Поэтому качественная очистка воздуха, топлива и масла – основной фактор снижения интенсивности изнашивания таких деталей двигателя, как например, цилиндры, поршни, кольца, сопряжения в подшипниках коленчатого и распределительного валов. Для повышения долговечности деталей в процессе эксплуатации автомобилей, необходимо следить за фильтрами очистки воздуха, топлива и масла, исключить попадание неочищенного воздуха в двигатель, абразивных частиц в топливо и масло при хранении и заправке.

Лекция 5. Способы получения информации о надежности машин.

Источниками информации о надежности машин являются расчеты при их проектировании, различные виды стендовых и дорожных испытаний, статистические данные об отказах конструктивных элементов, характере и причинах их возникновения, наработках до предельного состояния и других показателях эксплуатационной надежности.

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.

5.1. Оценка надежности машин с использованием структурных схем

При прогнозном расчете и анализе показателей надежности узлов, агрегатов и машин в целом широко используется *метод структурных схем*. Сущность метода заключается в том, что выполняющие определенные функции конструктивные элементы тех-

нической 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.5.1,а). Нарботка до отказа системы при таком соединении равна наработке до отказа того элемента, у которого она окажется минимальной:

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

где n – количество элементов системы.

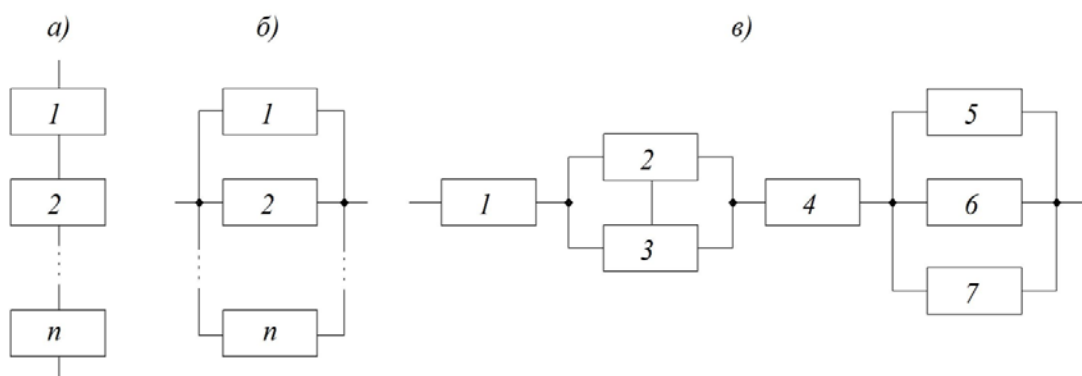


Рис. 5.1. Схемы соединения конструктивных элементов:

a – последовательное; $б$ – параллельное; $в$ – смешанное

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

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

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

Параллельным называют схему соединения, работоспособность которой нарушается при отказе всех входящих в нее конструктивных элементов (рис.5.1,б). Нарботка до отказа такой системы равна максимальной наработке входящих в нее элементов

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

Вероятность безотказной работы системы при параллельном соединении элементов составляет

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

В реальных технических системах схема соединения конструктивных элементов чаще всего представлена в виде совокупности последовательных и параллельных подсистем (рис.5.1,в). Такая схема соединения носит название *смешанной*. При расчете надежности при такой схеме соединения сначала определяются вероятности безотказной рабо-

ты ее подсистем, а затем – вероятность безотказной работы всей технической системы. Например, для схемы соединения, показанной на рис. 5.1,в, вероятность безотказной работы составит

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

5.2. Цель и виды испытаний машин

Испытания на надежность являются обязательным и неотъемлемым элементом разработки и изготовления машин. Высокого качества невозможно достичь без проведения всесторонних испытаний агрегатов, узлов, отдельных деталей, а также создаваемой машины в целом. Испытания являются источником достоверных сведений о качестве любой технической системы на всех этапах ее жизненного цикла, начиная с разработки проекта и заканчивая утилизацией

В зависимости от целей и стадий их проведения они подразделяются на доводочные, исследовательские, приемочные, квалификационные, контрольные и др.

Доводочные испытания выполняют для оценки влияния на надежность различных изменений, вносимых при доводке конструкции изделия. Проводят их до тех пор, пока надежность образца не достигнет необходимого, заданного при проектировании уровня. На рис. 5.2 схематично показаны результаты доводки узла, состоящего из четырех деталей. После проведения необходимых конструкторско-технологических мероприятий γ - процентные ресурсы всех деталей доведены до заданного γ - процентного ресурса проектируемого узла.

Исследовательские испытания проводят для углубленного изучения свойств изделий и факторов, влияющих на уровень надежности. К задачам таких испытаний относятся: определение законов распределения наработок до отказов; изучение закономерностей развития процессов изнашивания и разрушения; сравнение показателей долговечности или безотказности изделий, изготовленных с применением различных технологий; исследование допустимых напряжений для конкретных сопряжений и др.

Доводочные и исследовательские испытания являются основой технического прогресса в машиностроении, так как они во многом определяют эффективность новой машины и ее потребительские свойства.

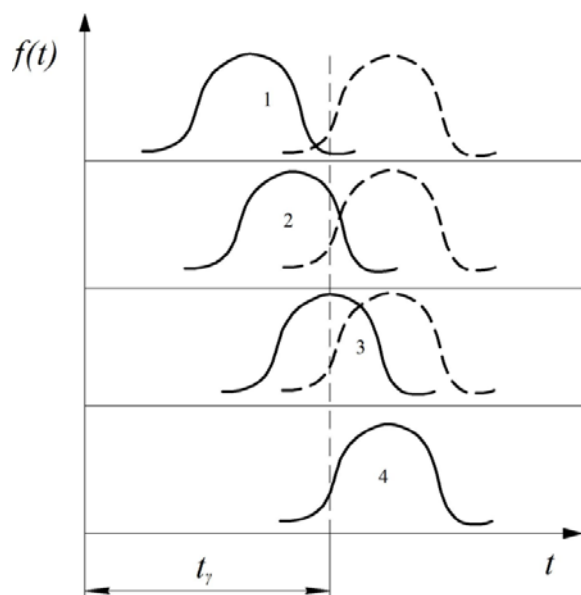


Рис. 5.2. Распределение ресурсов деталей узла:

— — до доводочных испытаний; - - - - после доводки;

t_γ – заданный γ -процентный ресурс узла

Приемочные испытания проводят с целью определения допустимости серийного производства изделий по показателям надежности, т.е. они являются барьером для задержки изделий, уровень надежности которых не в полной мере соответствует требованиям производства.

Квалификационные (установочные) испытания проводятся для проверки эффективности мероприятий по устранению дефектов, выявленных в процессе приемочных испытаний. Оценивается соответствие образцов установочной серии техническим условиям и другой нормативно - технической документации.

Контрольные испытания проводятся с целью оценки соответствия машин техническим условиям, стандартам и требованиям конструкторской документации. Проверяется стабильность качества изготовления, сборки, регулировок и пр. Проверяется надежность (безотказность) изделий в пределах определенной наработки (не менее гарантийной), а также эффективность конструкторских и технологических мероприятий, проведенных на производстве для устранения ранее выявленных при контроле недостатков.

Наряду с испытаниями, проводимыми для подготовки машин к серийному производству (доводочные, приемочные, исследовательские и др.) обязательным этапом являются их испытания в процессе эксплуатации. Именно эксплуатация является главной проверкой, как надежности, так и функциональных свойств любых изделий машиностроения, выявляющей все недостатки, в том числе не проявившиеся в процессе производства и ранее выполненных испытаниях.

5.3. Эксплуатационные испытания автомобилей на надежность

Для автомобилей, как транспортных средств повышенной опасности, предъявляются ужесточенные требования к показателям надежности. В связи с этим испытания автомобилей на надежность имеют некоторую специфику.

Основными задачами эксплуатационных испытаний являются:

- выявление характера и причин возникновения отказов в зависимости от наработки;
- определение коэффициентов готовности и использования;
- обоснование критериев предельного состояния деталей, узлов, агрегатов и, соответственно, их ресурсов;
- установление номенклатуры и норм расхода запасных частей;
- выявление деталей, лимитирующих надежность агрегатов;
- определение затрат на ТО и ремонты;
- изучение приспособленности автомобилей к проведению ТО и ремонта;
- разработка нормативов поддержания автомобилей в работоспособном состоянии.

В процессе таких испытаний неукоснительно выполняется инструкция по эксплуатации автомобилей, регистрируются все простои и поломки. Все неисправности, отказы фиксируют с указанием их пробега до восстановления или замены с момента ввода автомобиля в эксплуатацию до отправки в капитальный ремонт или на списание.

Однако, несмотря на все преимущества, эксплуатационные испытания обладают серьезным недостатком – большой длительностью. Если, например, ресурс автомобиля рассчитан на 400 – 450 тыс. км, и этот ресурс реализуется в течение 7 – 8 лет, то выход из строя даже агрегатов, имеющих пониженный ресурс, следует ожидать не ранее, чем через 3,5 – 4 года.

Конкретные задачи проведения эксплуатационных испытаний должны быть обусловлены теми целями, которые перед ними ставятся. Для оценки, например, эксплуатационной надежности каких либо конструктивных элементов автомобиля необходимо решить ряд задач в последовательности, приведенной на рис.5.3.

Результаты испытаний по эксплуатационной надежности заносятся в специальную ведомость, в которой фиксируется следующая информация: модель АТС, пробег с начала эксплуатации, сведения о выявленных отказах и неисправностях конструктивных элементов с указанием наработки, выполненные технические воздействия, направленные на восстановление работоспособности систем. Обработка статистической информации может осуществляться с помощью специальных программ: Microsoft Excel, STATISTICA и др. Полученные в результате обработки данные анализируются с целью определения элементов, лимитирующих надежность исследуемого узла или агрегата, средние наработки до отказа, основные причины возникновения отказов и неисправностей и т.д.



Рис. 5.3. Структурная схема экспериментальных исследований по оценке эксплуатационной надежности

5.4. Полигонные испытания

Получение информации о надежности автомобильной техники, являющейся основой оценки их качества, требует все более увеличивающихся испытательных пробегов, затрат труда и что самое главное, длительного времени. В современных условиях для непрерывного совершенствования конструкций, быстрой смены моделей на более надежные требуются все более сжатые сроки.

Необходимость ускорения испытаний привела к развитию *полигонных испытаний* автомобилей и его агрегатов с целью оценки их возможного ресурса и ускоренного выявления слабых мест. Проблема ускорения и форсирования испытаний на полигонах решается путем воздействия на элементы автомобиля увеличенных нагрузок и сокращения их времени.

Полигонные испытания по сравнению с эксплуатационными сокращаются по пробегу в несколько раз (для деталей подвески в 3 – 5 раз, кабин – 6 – 8 раз, рам – 2 – 3 раза и т.д.). Из табл. 5.2 видно, что продолжительность ресурсных полигонных испытаний в 2 – 3, а при их форсировании – в 10 и более раз меньше эксплуатационных до полной реализации ресурса.

Лекция 6. Числовые характеристики и законы распределения случайной величины наработок до отказа.

6.1. Числовые характеристики случайных величин

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:

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

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

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

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

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

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

6.2. Законы распределения случайных величин

Результаты испытаний дают возможность найти математическое описание полученных закономерностей, т.е. получить обобщенные зависимости, по которым определяются показатели надежности.

В общем случае в качестве таких обобщенных зависимостей используются интегральные функции распределения случайной величины (законы распределения) $F(x)$ и $P(x)$. Для автотранспортной техники в качестве случайной величины чаще всего используют значение наработки t (до 1 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 .

Интегральная функция распределения $F(t)$ показывает вероятность того, что случайная величина наработки T от начала эксплуатации до появления отказа окажется меньше некоторого заданного значения t , т.е.

$$F(t) = \text{Вер} (T < t).$$

Иными словами эта функция показывает вероятность того, что изделие откажет в заданном интервале наработки.

Графическая интерпретация интегральной функции распределения случайной величины наработки представлена на рис. 6.1, а.

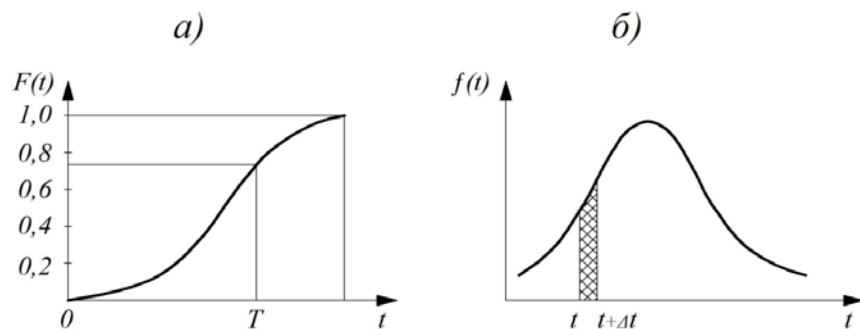


Рис.6.1. Графическая интерпретация интегральной (а) и дифференциальной (б) функций распределения случайной величины

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

Экспоненциальный закон распределения

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.). Графическая интерпретация экспоненциального распределения представлена на рис. 6.2.

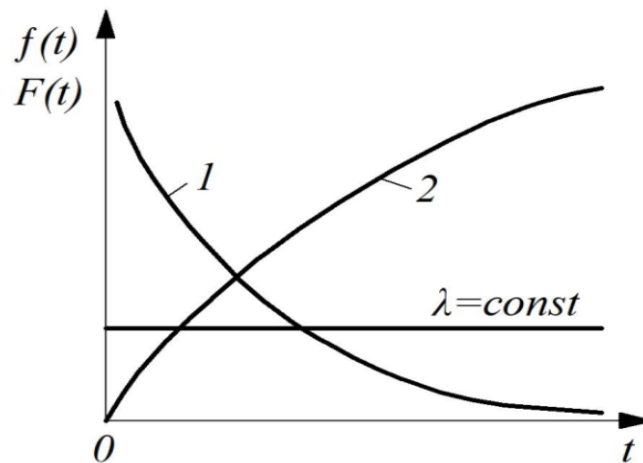


Рис.6.2. Дифференциальная (1) и интегральная (2) функции экспоненциального распределения

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):

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

Среднее квадратическое отклонение для экспоненциального закона распределения:

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

Коэффициент вариации:

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

Нормальный закон распределения

Нормальное распределение – наиболее часто используемое распределение при статистической оценке показателей надежности. Непрерывная случайная величина t называется нормально распределенной, если плотность ее вероятности имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}},$$

где $t_{\text{ср}}$ и σ – параметры нормального распределения (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение).

Нормальный закон является двухпараметрическим распределением с параметрами $t_{\text{ср}}$, характеризующим положение распределения на оси абсцисс, и σ , оценивающим рассеивание случайной величины относительно среднего значения.

На рис. 6.3 представлена графическая интерпретация кривых нормального распределения с одинаковыми значениями $t_{\text{ср}}$ и различными величинами σ . Интегральная функция нормального распределения описывается выражением:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-t_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}} dt.$$

При решении практических задач надежности для определения значений $f(t)$ и $F(t)$ прибегают к центрированию и нормированию нормального распределения.

Под центрированием понимается перенос центра группирования случайной величины $t_{\text{ср}}$ в начало координат. Тогда $t_{\text{ср}} = 0$, а среднее квадратическое отклонение $\sigma = 1$. Если ввести новую переменную $z = \frac{t-t_{\text{ср}}}{\sigma}$, то такая операция называется нормированием. В результате центрирования и нормирования получим новое дифференциальное распределение случайной величины z :

$$f_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}.$$

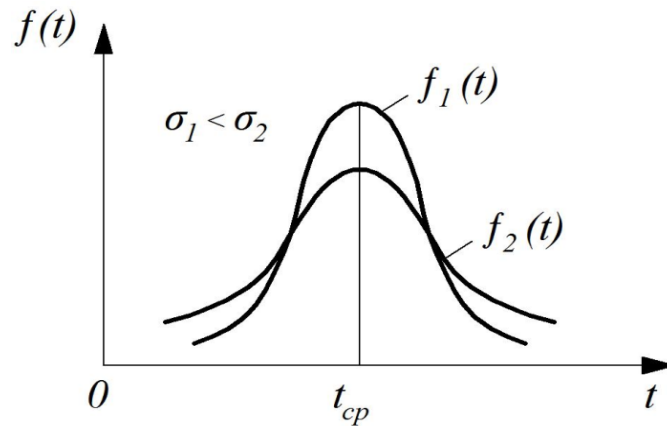


Рис. 6.3. Графическая интерпретация нормального распределения

Функция $f_0(z)$ является однопараметрической и ее значения приведены в таблицах нормального распределения. Интегральная функция распределения случайной величины в результате центрирования и нормирования примет вид:

$$F_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Функция $F_0(z)$, как и всякая функция распределения, обладает следующими свойствами:

$$F(-\infty) = 0; F(+\infty) = 1; F(z) - \text{неубывающая функция.}$$

Кроме того, в связи с симметричностью этого распределения с параметрами $t_{cp} = 0$ и $\sigma = 1$ относительно начала координат следует, что:

$$F(-z) = 1 - F(z).$$

После того, как найдены значения $f_0(z)$ и $F_0(z)$ необходимо выполнить обратный переход к исходным функциям $f(t)$ и $F(t)$, который осуществляется по формулам:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} f_0\left(\frac{t - t_{cp}}{\sigma}\right).$$

$$F(t) = F_0\left(\frac{t - t_{cp}}{\sigma}\right).$$

Для упрощения расчетов функции $F(t)$ при статистической обработке информации используется функция Лапласа

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Функция $\Phi(z)$ также как и функция $f_0(z)$ протабулирована. Табличное значение функции Лапласа показывает вероятность попадания значений случайной величины в интервал $(0; t)$.

Теоретическая вероятность попадания случайной величины t в интервал $(t_1; t_2)$ при нормальном распределении с использованием стандартной функции Лапласа определяется по формуле:

$$P(t_1 < t < t_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{t_2 - t_{\text{ср}}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - t_{\text{ср}}}{\sigma}\right).$$

Вероятности отказа и безотказной работы с использованием функции Лапласа определяются из выражений:

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma}\right); \quad P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma}\right).$$

Нормальный закон распределения хорошо описывает процессы, на которые влияют большое число независимых факторов, ни один из которых не оказывает на них преобладающего влияния. Ему подчиняются износные отказы, ресурсы агрегатов и отдельных деталей, люфты и зазоры в сочленениях, трудоемкости обслуживания и др.

Распределение Вейбулла

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 вдоль оси t ; 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 (рис.6.4).

Оценка математического ожидания и среднего квадратического отклонения случайной величины, распределенной по этому закону, может определяться различными методами (последовательного приближения на ЭВМ, максимального правдоподобия и др.).

Для практических целей используется приближенный метод, в соответствии с которым параметры распределения определяются по формулам:

$$t_{cp} = ak_b; \quad \sigma(t) = aq_b,$$

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 протабулированы и приведены в таблицах математической статистики.

Коэффициент вариации случайной величины t определяется по формуле:

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

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

$$b = f(v) = f\{\sigma(t)/t_{cp}\}$$

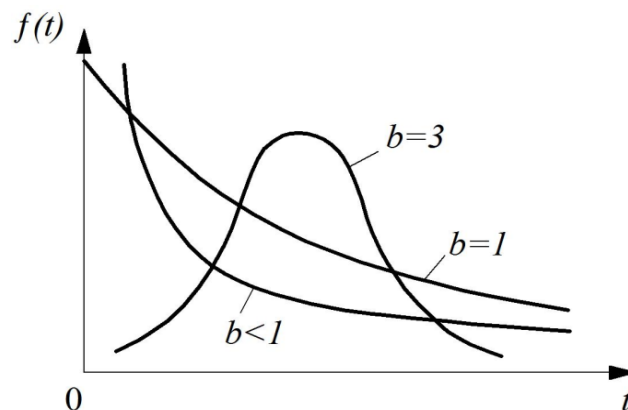


Рис.6.4. Кривые дифференциальной функции $f(t)$ распределения Вейбулла в зависимости от параметра формы b

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.

Если t предоставляет собой наработку до отказа, то 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 определяется выражением:

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

Лекция 7. Статистическая обработка экспериментальных данных о надежности транспортных машин.

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 описной ниже последовательности.

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

$$R = t_{\max} - t_{\min}.$$

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

$$k = 1 + 3,32 \lg N,$$

где N – объем выборки испытаний.

Находится ширина интервала вариационного ряда h

$$h = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k} = \frac{R}{k}.$$

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

$$t_0 = t_{\min} - h/2.$$

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

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

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 $\bar{t} \pm 3\sigma(t)$.

Если имеется несколько подозреваемых данных, то \bar{t}_{cp} и σ определяют без них, а затем проводят проверку каждого по приведенной схеме. В случае, когда проверяемые данные находятся внутри доверительного интервала, предположение об их аномальности ошибочно, их следует вернуть в выборку и учитывать при дальнейшем анализе.

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

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

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

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 . На рис. 6.1 в качестве примера приведена гистограмма распределения наработок свечей зажигания до отказа, построенная по результатам эксплуатационных наблюдений.

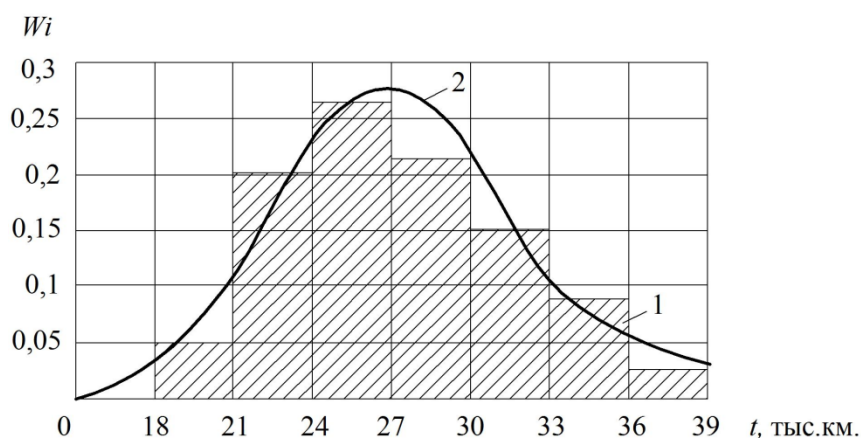


Рис.6.1. Гистограмма 1 и теоретическая кривая распределения 2 значений наработки свечей зажигания до отказа

В связи с ограниченностью объема выборки обследований в полученном распределении в той или иной мере присутствуют элементы случайности. Только при очень большом числе статистических данных, что практически осуществить очень сложно, эти элементы случайности сглаживаются. Поэтому при обработке статистических данных возникает задача подбора теоретической кривой распределения к полученной гистограмме.

Такая теоретическая кривая, описывающая распределение случайной величины математической зависимостью, носит название дифференциальной функции закона распределения или плотностью вероятностей $f(t)$. Эта функция не только дает наглядное представление о кривой распределения, но и позволяет определить любую его числовую характеристику.

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 приведенном на рис.6.1 примере дифференциальная функция распределения (кривая 2) получена с помощью программы Microsoft Excel.

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

Следует, однако, отметить, что между подобранной теоретической кривой и статистическим распределением 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 принадлежности резуль-

татов испытаний по надежности машин выбранному закону распределения чаще всего используется критерий χ^2 Пирсона, который записывается в виде альтернативного условия

$$\chi_{\text{опыт.}}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i} = \begin{cases} \leq \chi_{\text{табл.}}^2(\alpha, S) \\ > \chi_{\text{табл.}}^2(\alpha, S) \end{cases},$$

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

$$S = k - r - 1,$$

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. 6.1.

Таблица 6.1. 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;
- 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 $\chi_{\text{табл.}}^2$;
- сравнивают вычисленное значение критерия $\chi_{\text{опыт.}}^2$ с табличным $\chi_{\text{табл.}}^2$.

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.

Критерий Колмогорова

В соответствии с этим критерием определяется максимальное значение модуля разности D между статистической $\bar{F}(t)$ и соответствующей ей теоретической $F(t)$ функциями распределения (рис. 6.2).

$$D = \max |\bar{F}(t) - F(t)|.$$

Использование критерия Колмогорова осуществляется по следующей схеме:

- строится статистическая функция распределения $\bar{F}(t)$;
- по виду гистограммы и значению коэффициента вариации v подбирается закон распределения;
- строится теоретическая интегральная функция распределения $F(t)$;
- определяется величина $\lambda = D\sqrt{N}$ и по табл. 6.2 находится вероятность $P(\lambda)$.

Таблица 6.2. Значения вероятностей $P(\lambda)$

| λ | $P(\lambda)$ | λ | $P(\lambda)$ | λ | $P(\lambda)$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| 0,0 | 1,00 | 0,7 | 0,711 | 1,4 | 0,040 |
| 0,1 | 1,00 | 0,8 | 0,544 | 1,5 | 0,022 |
| 0,2 | 1,00 | 0,9 | 0,393 | 1,6 | 0,012 |
| 0,3 | 1,00 | 1,0 | 0,270 | 1,7 | 0,006 |
| 0,4 | 0,997 | 1,1 | 0,178 | 1,8 | 0,003 |
| 0,5 | 0,964 | 1,2 | 0,112 | 1,9 | 0,002 |
| 0,6 | 0,864 | 1,3 | 0,068 | 2,0 | 0,001 |

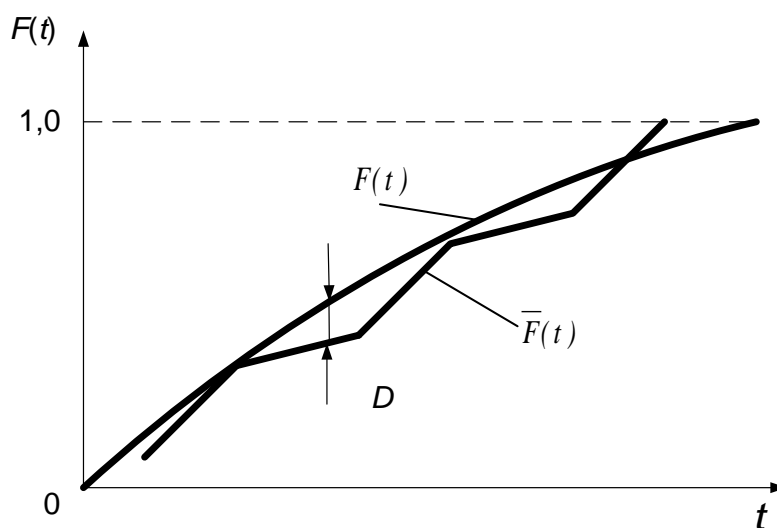


Рис. 6.2. Статистическая $\bar{F}(t)$ и теоретическая $F(t)$ функции распределения

Вероятность $P(\lambda)$ – это вероятность того, что за счет случайных причин максимальное расхождение между $\bar{F}(t)$ и $F(t)$ будет не меньше, чем фактически найденное при их сравнении. Если вероятность $P(\lambda)$ мала (меньше 0,05 – 0,1), то гипотезу о принадлежности опытных данных к выбранному закону следует отвергнуть как неправдоподобную; при $P(\lambda) \geq 0,6$ ее можно считать совместимой с опытными данными

Лекция 8. Факторы, влияющие на надежность машин в эксплуатации.

Эксплуатация технических систем является более длительным, трудоемким и дорогим процессом, чем их производство. Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт автомобиля, например, за весь период эксплуатации по разным оценкам в 5 - 10 раз превышают его первоначальную стоимость. Поэтому поддержание работоспособного состояния технических систем в эксплуатации является важнейшей составной частью общей системы обеспечения их надежности, предыдущими этапами которой являются проектирование и производство.

8.1. Факторы, влияющие на надежность машин в эксплуатации

На фактические показатели надежности транспортных машин, в том числе и автомобилей, существенное влияние оказывают условия и методы эксплуатации, принятая система технического обслуживания и ремонта, квалификация персонала и др. (табл. 8.1).

Таблица 8.1. Факторы, влияющие на надежность автомобилей в эксплуатации

| Условия эксплуатации | Система ТО и ремонта | Персонал | Производственно-техническая база |
|---|--|----------------------------------|--|
| Тип и состояние дорожного покрытия. | Методы организации ТО и ремонта. | Квалификация персонала. | Обеспеченность площадями |
| Природно-климатические условия. | Использование средств диагностики | Условия и организация труда. | Оснащенность технологическим оборудованием. |
| Эксплуатационные режимы работы автомобилей. | Качество выполнения ТО и ремонта. | Социально-бытовые условия | Уровень механизации процессов ТО и ремонта. |
| Агрессивность окружающей среды. | Материально-техническое обеспечение. | Повышение квалификации персонала | Способ хранения автомобилей. |
| Качество эксплуатационных материалов | Совершенствование системы управления производством | Стимулирование качества работы | Развитие специализации и кооперации ТО и ремонта |

8.1. Стратегии технического обслуживания и ремонта

На автомобильном транспорте возможны две стратегии управления ТО и ремонтом автотранспортных средств:

I – техническое обслуживание по наработке, в соответствии с которой перечень и периодичность выполнения операций определяются плановыми значениями пробегов автомобиля;

II – техническое обслуживание и ремонт по состоянию, при которой перечень и периодичность выполнения технических воздействий, направленных на обеспечение работоспособности автомобилей, назначаются в соответствии с их фактическим техническим состоянием.

При плановом проведении технического обслуживания по первой стратегии для всех изделий через определенный пробег или интервал времени выполняется регламентированный объем профилактических работ, а параметры их технического состояния доводятся до номинальных или близких к ним значений.

Очевидный недостаток системы ТО и ремонта по наработке заключается в том, что в реальных условиях эксплуатации неизбежна вариация технического состояния изделий. Значительная их часть к моменту проведения регламентных работ по ТО или ремонту не нуждаются в них, так как имеют потенциальную наработку на отказ (остаточный ресурс), значительно превышающую плановую периодичность выполнения технических воздействий.

Проведение ненужных операций ТО и ремонтных воздействий по наработке существенно снижают эффективность технической эксплуатации машин и не всегда обеспечивает необходимый уровень их надежности. Вследствие разных условий эксплуатации, режимов работы, квалификации водителей, качества и точности изготовления машин и дру-

гих факторов интенсивность изменения их технического состояния является величиной случайной (рис.8.1). Для множества однотипных изделий изменение параметра Y , определяющего их техническое состояние, носит случайный характер и характеризуется дифференциальной функцией распределения $f(t)$.

Отказ изделия происходит в момент пересечения реализацией $Y_i(t)$ уровня, соответствующего предельному значению параметра $Y_{пр}$. Под влиянием неблагоприятных условий внешней среды отказ какой-то части изделий может произойти до проведения плановых технических воздействий (реализация 1). Остаточный ресурс большей части изделий (реализации 2,...,i) остается нереализованным.

Таким образом, применение стратегии проведения ремонта по назначенной наработке приводит к существенному недоиспользованию индивидуальных ресурсов большинства изделий и может быть рекомендовано только при предъявлении к ним высоких требований по надежности.

Стратегия технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию позволяет если не избежать в полном объеме перечисленные недостатки, то значительно снизить их. Эта стратегия, несмотря на соблюдении принципа плановости проведения ТО и ремонта, существенно отличается от выполнения этих операций по наработке.

С заданной периодичностью здесь выполняются только контрольно-диагностические и некоторые виды регламентных профилактических работ (замена масел, рабочих жидкостей, фильтров и др.). Регулировочные, разборочно-сборочные, ремонтные работы выполняются только по результатам диагностирования и контроля.

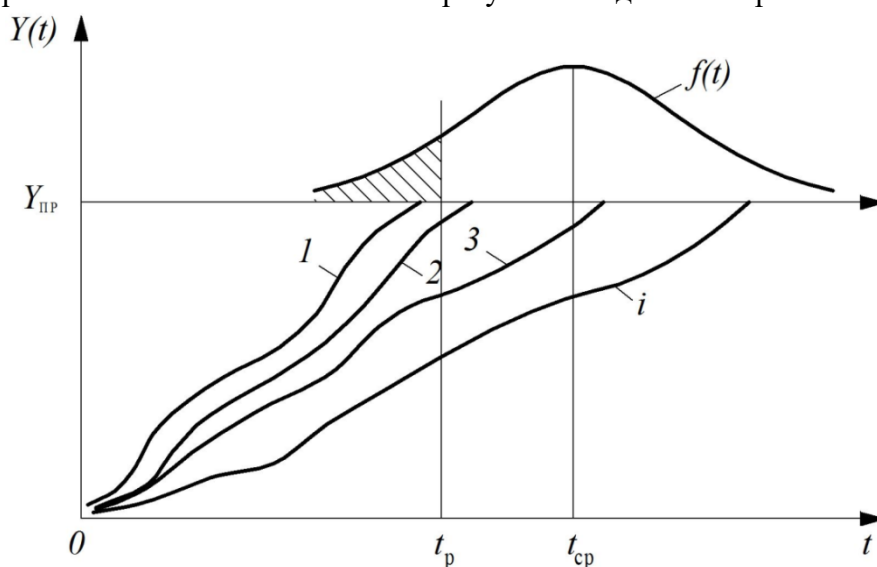


Рис. 8.1. Схема формирования отказа изделия

8.2. Техническое обслуживание автомобилей

Техническое обслуживание представляет собой комплекс работ, направленных на поддержание объекта в работоспособном состоянии в процессе его эксплуатации и обеспечение его надежной работы. Это достигается, во-первых, предупреждением возникновения отказов за счет предупредительного контроля и доведения параметров технического состояния автомобиля до номинальных или близких к ним значений; во-вторых, преду-

преждем отказов в результате уменьшения интенсивности изменения параметров технического состояния, снижением темпа изнашивания сопряженных деталей.

Зависимость технического состояния автомобилей от большого числа факторов обуславливает необходимость обоснования рациональных режимов их технического обслуживания, под которыми понимаются периодичности ТО, объемы работ и трудоемкости их выполнения.

Периодичность ТО на автотранспортных предприятиях в зависимости от конкретных условий может определяться:

- по допустимому уровню безотказности;
- по закономерности изменения параметра технического состояния и его допустимому значению;
- по минимуму суммарных удельных затрат на ТО и ремонт (техно-экономический метод);
- по диагностической информации о техническом состоянии объекта.

Периодичность ТО по **допустимому уровню безотказности** определяется из условия, что вероятность безотказной работы изделия не может быть ниже заданной величины R_d , называемой риском:

$$P_d(t_i \geq t_0) \geq R_d = \gamma,$$

где P_d – допустимая вероятность безотказной работы; t_i – наработка на отказ; t_0 – периодичность ТО; γ – заданная вероятность безотказной работы.

Периодичность ТО в соответствии с этим методом принимают обычно равной значению гамма-процентного ресурса, то есть $t_0 = t_\gamma$ (рис. 8.2). Такая периодичность обеспечивает высокий уровень безотказной работы автомобиля на наработке между очередными профилактическими обслуживаниями.

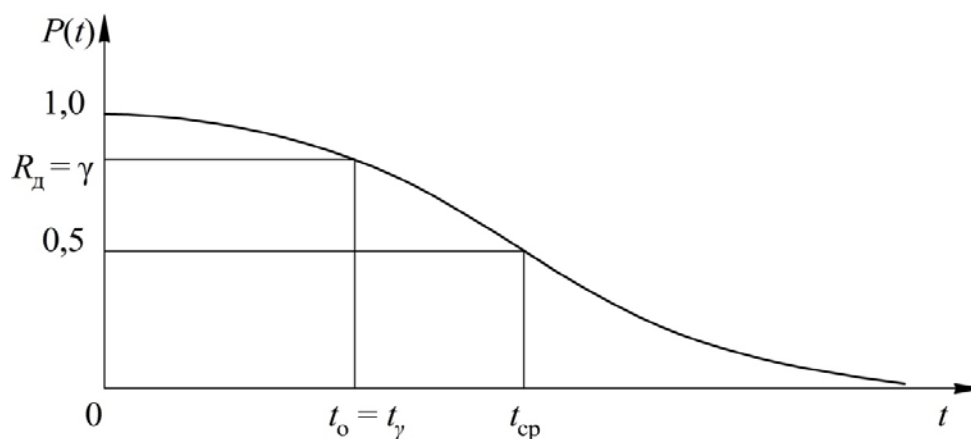


Рис. 8.2. Определение периодичности ТО по допустимому уровню безотказности

Метод определения периодичности ТО по **закономерности изменения параметра технического состояния и его допустимому значению** является статически – аналитическим.

Изменение любого параметра технического состояния у группы автомобилей в зависимости от множества факторов, оказывающих влияние на интенсивность этого процесса α , происходит в широких пределах (рис. 8.3, кривые 1 – 7).

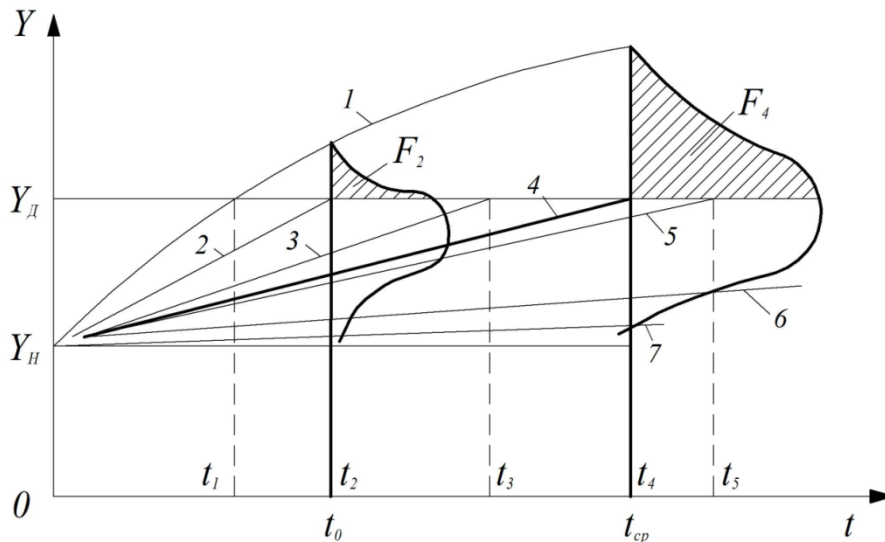


Рис. 8.3. Схема определения периодичности ТО по допустимому значению и закономерности изменения параметра технического состояния

По статистическим реализациям параметра Y можно определить среднее значение наработки изделий t_{cp} до достижения ими допустимого значения Y_D . На схеме этому значению наработки соответствует реализация 4 и средняя интенсивность изменения параметра α_{cp} .

Если принять периодичность ТО, равной средней наработке, то часть автомобилей, интенсивность изменения параметра которых выше α_{cp} , с высокой степенью вероятности откажут на наработках, существенно ниже t_{cp} (реализации 1, 2, 3). Для автомобиля 1, например, вероятность отказа составит: $F = F_4 = 0,5$.

При проведении технического обслуживания с меньшей периодичностью (например, t_1) обеспечивается высокая безотказность автомобилей, однако значительно недоиспользуются их потенциальные ресурсы.

Поэтому периодичность технического обслуживания в соответствии с этим методом выбирают такую, при которой вероятность отказа между плановыми ТО не превысит заданной величины R_0 , например F_2 .

Более широкое распространение в системе управления техническим обслуживанием восстанавливаемых объектов получил **технико-экономический метод** определения периодичности ТО. Оптимальная периодичность в соответствии с этим методом принимается по критерию минимальных удельных затрат на ТО и ремонт (рис.8.5).

В аналитической форме метод можно представить в виде целевой функции, экстремальное значение которой соответствует оптимальному решению

$$C_{y\partial} = C_{mo}/t_0 + C_p/t_p \Rightarrow \min$$

где C_{mo} - затраты на операции ТО; C_p - затраты на ремонтные воздействия; t_0 - периодичность обслуживания; t_p - наработка между выполнением ремонтных воздействий.

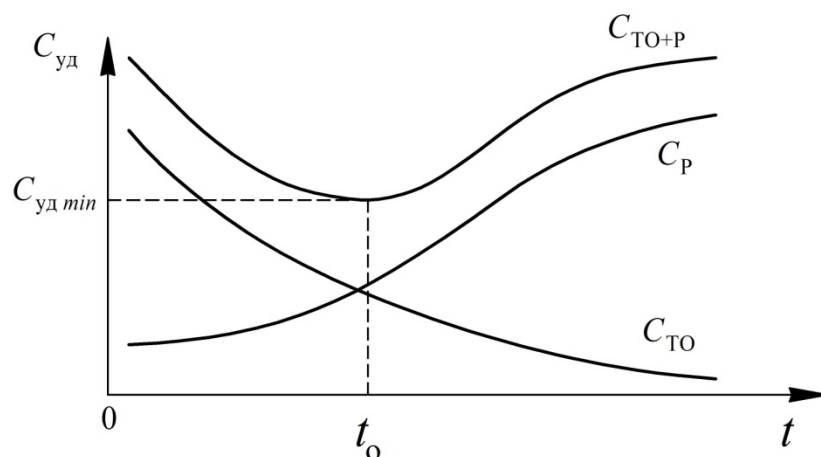


Рис. 8.5. Зависимость затрат на ТО и ремонт от периодичности ТО

Метод определения периодичности ТО автомобилей **по диагностической информации** базируется на индивидуальной оценке их технического состояния. Широкое внедрение в технологический процесс диагностирования обеспечивает систему ТО и ремонта информацией о фактическом состоянии автомобилей и позволяет более полно использовать их потенциальные возможности.

Лекция 9. Прогнозирование остаточного ресурса транспортных машин

Одной из основных задач диагностирования является прогнозирование остаточного ресурса объекта, под которым понимается определение продолжительности его исправной работы до наступления 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. Поэтому на стадии проектирования в качестве прогнозируемого ресурса в технической документации указывается некоторый средний ресурс $t_{ср}$ – математическое ожидание наработки изделия до предельного состояния.

В реальных условиях эксплуатации ресурс объекта из-за воздействия на него множества случайных факторов варьирует в довольно широких пределах. Например, ресурс двигателей ЗМЗ – 4063.10 по результатам эксплуатационных наблюдений варьирует от 160 до 250 тыс. км (рис.9.1). Поэтому ресурс объекта, следует считать случайной величиной и может быть описан только вероятностными моделями. В качестве такой модели обычно используется дифференциальная функция (плотность) распределения наработок объекта до предельного состояния. В этом случае теоретическое значение среднего ресурса автомобиля от начала его эксплуатации до списания определяется по формуле:

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

где $f(t)$ – плотность распределения наработки.

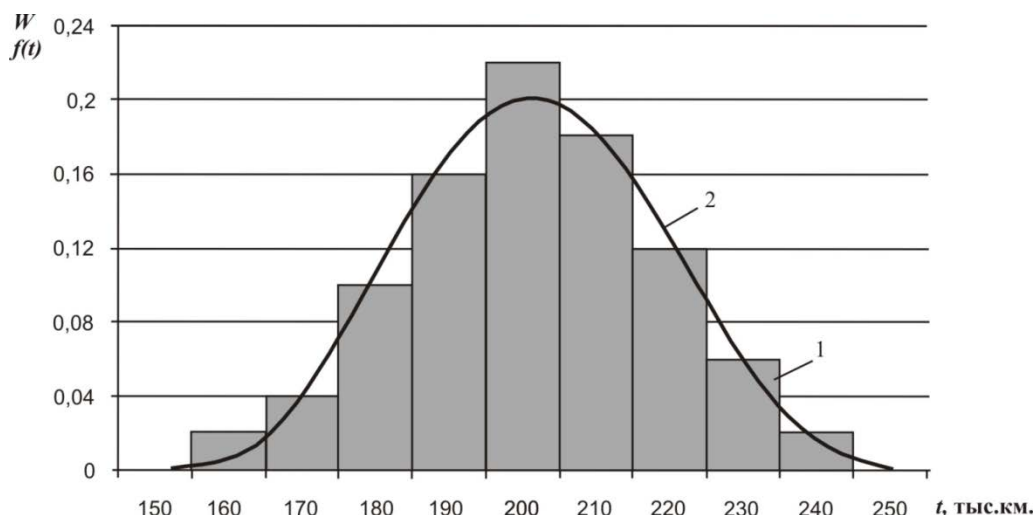


Рис. 9.1. Гистограмма 1 и теоретическая кривая распределения 2 ресурса двигателей

В отличие от стадии проектирования, когда прогнозируется ресурс всей генеральной совокупности создаваемых объектов, прогнозирование на стадии эксплуатации выполняют для конкретных изделий, частично реализовавших свой ресурс. 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.

Для надежного прогнозирования остаточного ресурса объекта необходимо выполнить его полнокомплектное техническое диагностирование с использованием соответствующих средств контроля. Это требует больших затрат, из-за чего в практике технической эксплуатации, за исключением случаев, когда оцениваются единичные и дорогостоящие машины, не находит применения. В условиях реальной эксплуатации при проведении технических обслуживаний и ремонтов машин чаще всего оценивается остаточный ресурс их узлов, агрегатов и механизмов.

Современные методы прогнозирования технического состояния объектов подразделяются на три основные группы: методы экспертных оценок, методы моделирования, статистические методы.

Наиболее достоверными при прогнозировании индивидуального остаточного ресурса машин 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:

- сбор и обработка статистической информации по эксплуатационной надежности объектов;
- обоснование комплекса диагностических параметров, адекватно отражающих их техническое состояние;
- построение графиков изменения диагностических параметров по статистическим данным;

- разработка аналитических уравнений, описывающих закономерности изменения этих параметров по наработке;
- статистическая оценка остаточного ресурса.

При прогнозировании непосредственно измерить остаточный ресурс объекта практически невозможно. Поэтому необходимо определить аналоговый диагностический параметр или комплекс таких параметров, которые адекватно отражают техническое состояние объекта и реализацию его ресурса по наработке. Для агрегатов автомобиля это могут быть параметры эффективности функционирования (мощность, крутящий момент, расход топлива и др.), геометрические параметры (люфты, зазоры) и параметры сопутствующих процессов (герметичность рабочих объемов, вибрации, физико-химический состав обработавших эксплуатационных материалов и т.д.).

Изменение аналогового диагностического параметра по наработке для большинства узлов и агрегатов автомобиля, как уже отмечалось выше, описывается линейной или степенной функциями. При прогнозировании их ресурса в качестве аналитического уравнения чаще всего используется степенная функция. Графическая интерпретация этой зависимости представлена на рис.9.2.

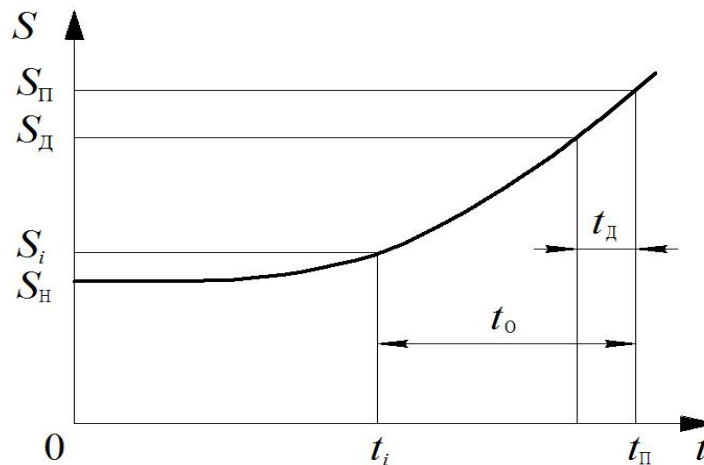


Рис. 9.2. Схема определения остаточного ресурса по реализации диагностического параметра: $S_i, S_H, S_П$ – текущее, номинальное и предельное значение диагностического параметра; $t_i, t_0, t_П$ – текущий, остаточный и полный ресурс

Из приведенной схемы видно, что остаточный ресурс объекта t_0 представляет собой разность между полным ресурсом $t_П$, который соответствует предельному значению диагностического параметра $S_П$, и продолжительностью его эксплуатации, предшествующей прогнозируемому периоду t_i . Полный ресурс объекта $t_П$ при степенной зависимости диагностического параметра по наработке определяются из выражения:

$$t_i = \alpha \sqrt[\nu]{\frac{|S_i - S_H|}{\nu}}$$

Остаточный ресурс t_0 после некоторой наработки t_i , предшествующей прогнозируемому периоду, определяется по формуле:

$$t_{\dot{i}} = t \left[\left(\frac{S_{\dot{i}} - S_{\dot{i}}}{S_i - S_{\dot{i}}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right],$$

где α – показатель степени, характеризующий изменение диагностического параметра S по наработке t .

Значения показателя α определяются опытным путем для различных сопряжений механизмов на основе обработки статистического материала и представляют собой некоторые усредненные величины.

Управление техническим состоянием автомобилей на базе диагностической информации

Под управлением техническим состоянием объекта подразумевается комплекс технических воздействий, направленных на предупреждение отказов и восстановление значений параметров технического состояния до требуемого уровня.

Система управления техническим состоянием автомобилей базируется на достоверной информации о текущем состоянии элементов автомобилей, которая может быть получена только в процессе их диагностирования. На основе этой информации в производстве решаются следующие задачи:

- по данным фактических изменений параметров технического состояния элементов автомобиля устанавливаются периодичности ТО-1 и ТО-2;
- выявляется необходимый перечень и объем работ по ТО и ремонту;
- по параметрам технического состояния оценивается остаточный ресурс диагностируемых узлов и агрегатов и т.д.

Предварительное определение фактического объема работ ТО-2 на базе диагностической информации сокращает трудоемкость их выполнения по сравнению с нормативными значениями на 15-20%. Диагностирование при выполнении ремонта позволяет выявить скрытые и нечетко выраженные отказы и неисправности, предупредить их возникновение, что существенно снижает простои автомобилей в ТР.

Функциональная схема управления производственными процессами ТО и ремонта автомобилей с диагностированием их технического состояния приведена на рис. 9.3. Исходные данные X_0 , вводимые в управляющую систему (УС), выдаются в виде необходимости проведения различных видов ТО или ремонта. Объем технических воздействий и перечень операций из-за вариации технических состояний автомобиля, обусловленных влиянием факторов внешней среды (ВС), уточняется с помощью средств диагностирования (СД). Результаты диагностирования в виде значений диагностических параметров X_i вводятся в управляющую систему.

Управляющая система (главный инженер, начальник производства) принимает решение о проведении необходимых технических воздействий (ТВ) по каждому конкретному автомобилю с целью доведения конструктивных элементов автомобиля Y_i до нормативных или близких к нему значений. Принятые в управляющей системе решения реализуются проведением необходимых операций ТО или ремонта.

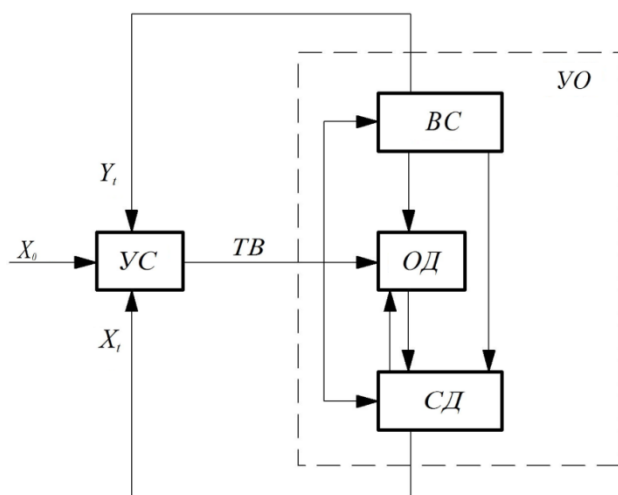


Рис. 9.3. Схема управления техническим состоянием объекта в эксплуатации

применительно к управляемому объекту, исключить затраты на проведение преждевременных операций профилактических и ремонтных работ, сократить расходы запасных частей и материалов, оценить качество ремонтно-профилактических работ, полнее использовать заложенный в объект потенциальный ресурс. Отсутствие диагностирования в системе управления делает ее неуправляемой, разомкнутой.

Список использованной литературы

1. Баженов Ю.В. Основы теории надежности машин : учеб. пособие / Ю.В.Баженов. – М.: Форум, 2014. – 320 с.
2. Болдин А.П. Основы научных исследований : учебник / А.П.Болдин, В.А.Максимов. – М. : ИЦ «Академия», 2012. – 336 с.
3. ГОСТ 27002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 38с.
4. ГОСТ 27578–87. Техническая диагностика. Диагностирование изделий. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 20 с.
5. Денисов А.С. Практикум по технической эксплуатации автомобилей : учеб пособие / А.С.Денисов, А.С.Гребенников. – М. : ИЦ «Академия», 2012. – 272 с.
6. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем : учебник для вузов / В.А.Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
7. Колесник П.А. Материаловедение на автомобильном транспорте : учебник для вузов / П.А. Колесник, В.С.Кланица. – М. : ИЦ «Академия», 2012. – 320 с.
8. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – Изд-во стандартов, 1990. – 132 с.
9. Мирошников Л.В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях / Л.В.Мирошников, А.П.Болдин, В.И.Пал. – М.: Транспорт, 1977. – 263 с.
10. Проников А.С. Надежность машин / А.С.Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 532 с.

Результативность выполненных технических воздействий проверяется подсистемой обратной связи сравнением диагностических параметров после выполнения ТО или ремонта с их нормативными значениями. Если полученные результаты соответствуют нормативным значениям, автомобиль считается технически исправным и направляется в эксплуатацию.

Таким образом, внедрение диагностирования в процесс управления техническим состоянием позволяет уточнить объемы регламентных работ

Методические указания к практическим занятиям

Работа №1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АГРЕГАТОВ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Цель работы – изучить:

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

1.1. Общие понятия о надежности и работоспособности

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.

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

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

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.

В соответствии с возможностью восстановления утраченной в процессе эксплуатации работоспособного состояния ТС подразделяются на *восстанавливаемые* и *невосстанавливаемые*.

Восстанавливаемыми называют ТС, для которых восстановление работоспособного состояния предусмотрено нормативно-технической и (или) конструкторской документацией. Такие ТС после проведения необходимых ремонтных операций продолжают выполнять свои функции.

Невосстанавливаемыми называют объекты, для которых при потере работоспособности проведение ремонтных работ не предусмотрено нормативно-технической документацией. Такие изделия подлежат замене после первого отказа.

Исправное состояние – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

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.

Отказ – 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.

1.2. Показатели для оценки долговечности

Для оценки долговечности технических систем 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, пересекает площадь под кривой $f(t)$ на две области: справа находится область, площадь которой равна вероятности работы без нарушения работоспособного состояния, а слева - область, площадь которой равна вероятности работы с возможными отказами.

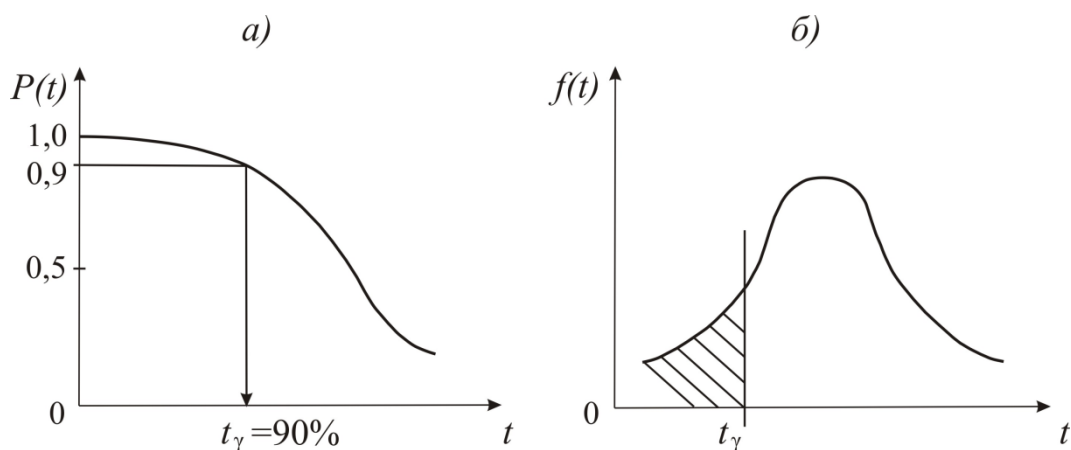


Рис. 1. Схема определения γ – процентного ресурса

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

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

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 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 $t_{cp} = 201,304$ тыс. км;
- среднеквадратическое отклонение $\sigma(t) = 34,421$ тыс. км;
- коэффициент вариации $v = 0,17$.

Строим гистограмму распределения ресурса 1 и аппроксимирующую ее плотность вероятности (рис. 2) и интегральную функцию распределения ресурса по наработке (рис. 3).

Для определения гамма-процентного ресурса задают значение $\gamma = 0.8$ (80 %) или $\gamma = 0.9$ (90 %) и с использованием графика распределения ресурса находят его значение. Например, гамма-процентному ресурсу $\gamma = 0.8$ (80 %) соответствует ресурс $t_\gamma \approx 183$ тыс. км.

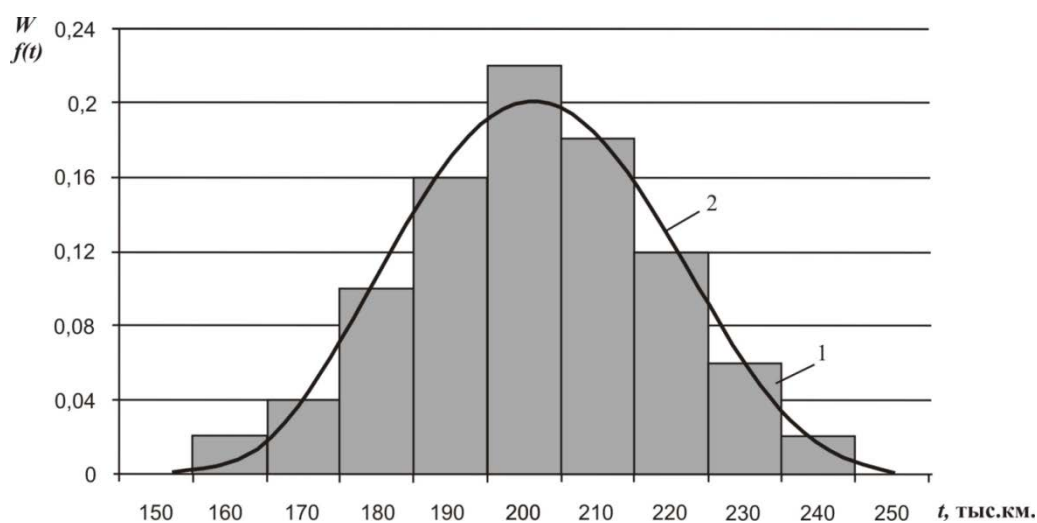


Рис. 2. Гистограмма 1 и дифференциальная функция распределения 2 ресурса двигателей

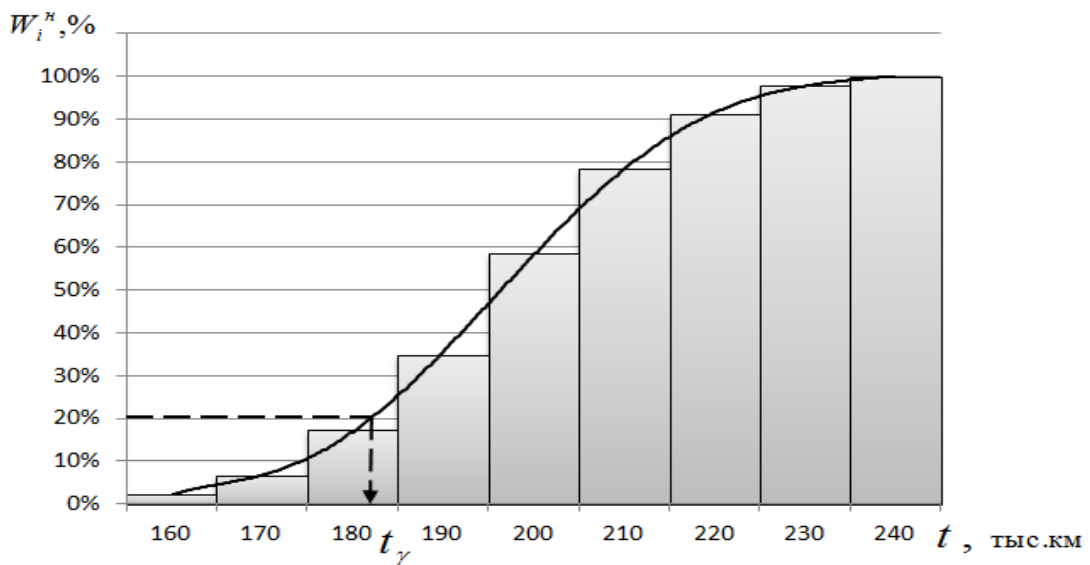


Рис. 3. Интегральная функция распределения ресурса двигателей по наработке

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.

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 № 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ АГРЕГАТОВ И СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Цель работы – изучить:

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

2.1. Показатели безотказности

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).

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.

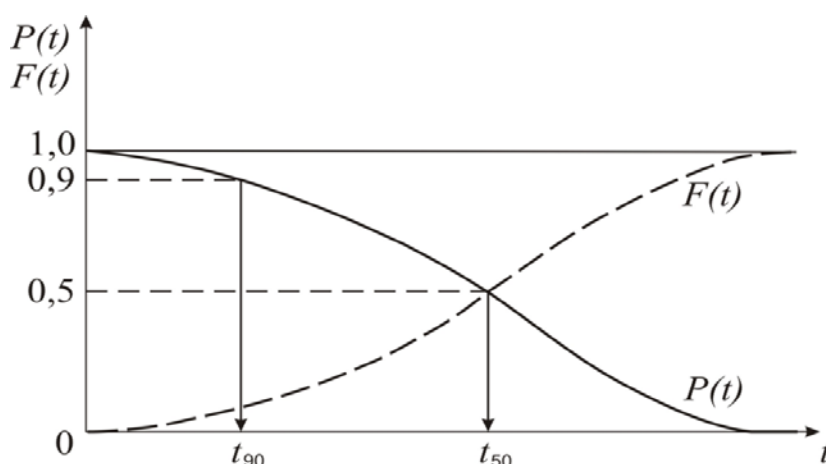


Рис. 1. Изменение вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$ по наработке

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.

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

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

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i \cdot m_i = \frac{1}{36} (19,5 \cdot 1 + 22,5 \cdot 6 + 25,5 \cdot 9 + 28,5 \cdot 10 + 31,5 \cdot 5 + 34,5 \cdot 3 + 37,5 \cdot 2) = 27,9 \text{ тыс.км}$$

- статистические оценки вероятности безотказной работы по интервалам наработок 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:

$$\bar{\lambda}(t_1) = \frac{36-35}{36 \times 3000} = 0,0011 \quad \bar{\lambda}(t_2) = \frac{35-29}{35 \times 3000} = 0,0024 \quad \bar{\lambda}(t_3) = \frac{29-9}{29 \times 3000} = 0,0022 \times$$

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 № 3.

Цель работы – изучить:

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

Общие сведения

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

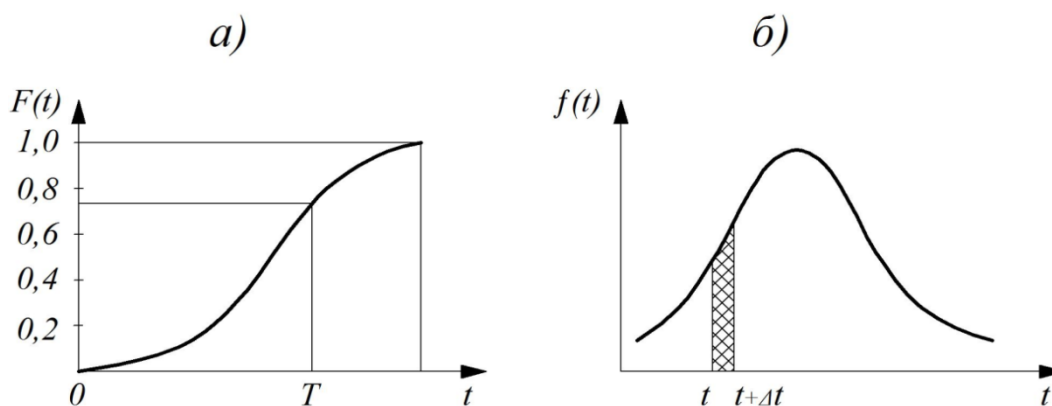


Рис.1. Графическая интерпретация интегральной (а) и дифференциальной (б) функций распределения случайной величины

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

Порядок обработки экспериментальных данных

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

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

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

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

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

где N – объем выборки испытаний.

Находится ширина интервала вариационного ряда h

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

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

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

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

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

В каждом интервале определяется его середина

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1. Находим параметры статистического ряда распределения:

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

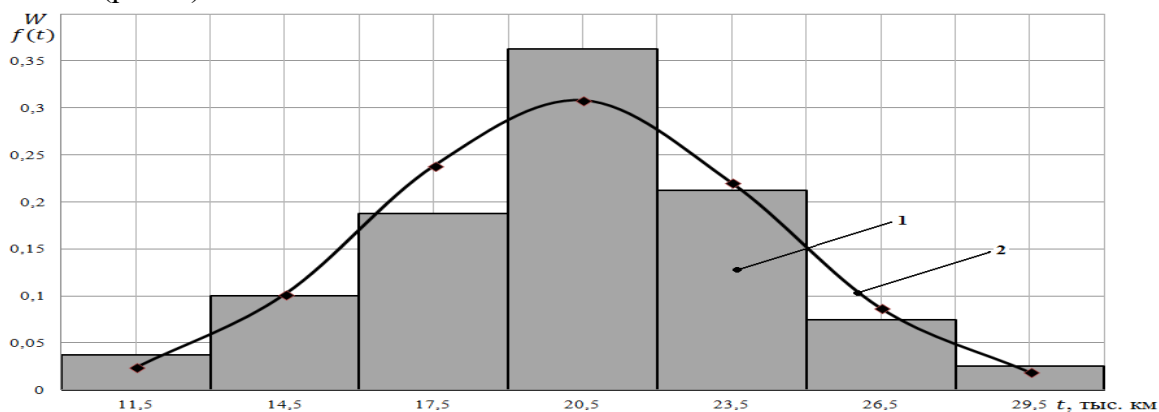


Рис. 2. Гистограмма 1 и теоретическая кривая распределения наработок до отказа шаровых пальцев рулевого управления автобусов ЛиАЗ – 5256

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 автобусов

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

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

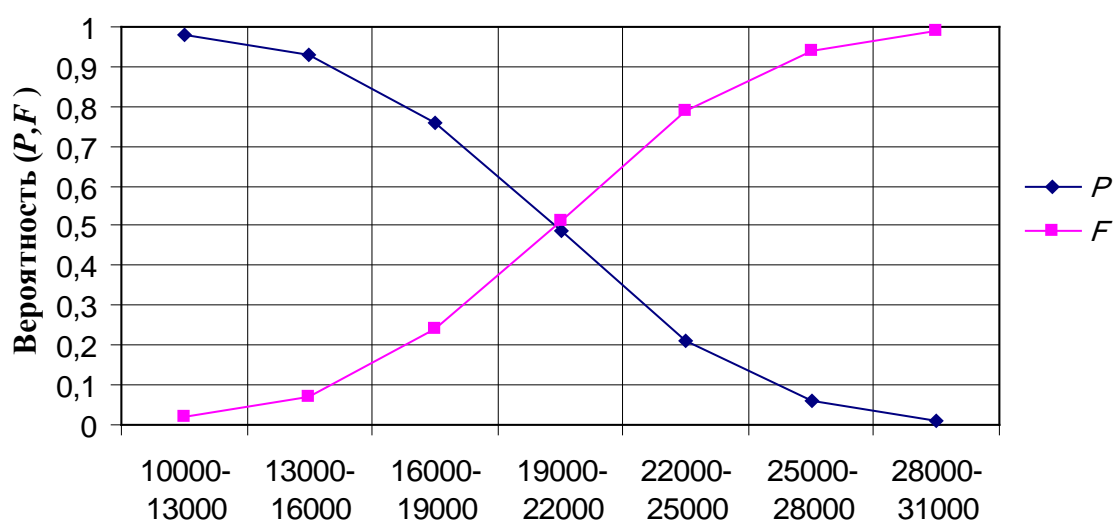


Рис. 3. Графики функций вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ шаровых пальцев рулевого управления автобусов

Выполнение работы

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

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

Продолжительность работы 2 часа.

Задание. По заданному вариационному ряду рассчитать показатели надежности.

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

- наименование и цель работы;
- числовые характеристики случайных величин;
- исходные данные индивидуального задания и результаты расчетов показателей надежности;
- подбор закона распределения;

- гистограмма распределения наработок до отказа, графики распределения вероятностей безотказной работы $P(t_i)$ и отказов $F(t_i)$;
- заключение и выводы по надежности исследуемого изделия.

Контрольные вопросы

1. Числовые характеристики, оценивающие надежность машин. Приведите формулы для их расчета.
2. Раскройте сущность законов распределения случайных величин. Какими законами описываются распределение наработок автомобиля?
3. Порядок обработки экспериментальных данных.

Работа № 4

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 принадлежности 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 $\chi^2_{\text{табл}}$ 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 $\chi^2_{\text{опыт}}$;
- 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.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за двигателями ЗМЗ-406 были выявлены наработки до отказа вкладышей коренных шеек коленчатого вала (табл. 2). Требуется установить закон распределения, проверить гипотезу о принадлежности статистических данных выбранному закону, определить основные параметры распределения отказов по наработке.

Таблица 2. Значения наработок вкладышей коренных шеек коленчатого вала

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

Расчеты выполнены с использованием программы Excel по вышеизложенной методике.

1. Находим параметры статистического ряда распределения:

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

2. Определяем числовые характеристики выборки:

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

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

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

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

Для нормального закона распределения с целью удобства вычислений проводим нормирование случайной величины наработки t , которая заключается в переходе к новой

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

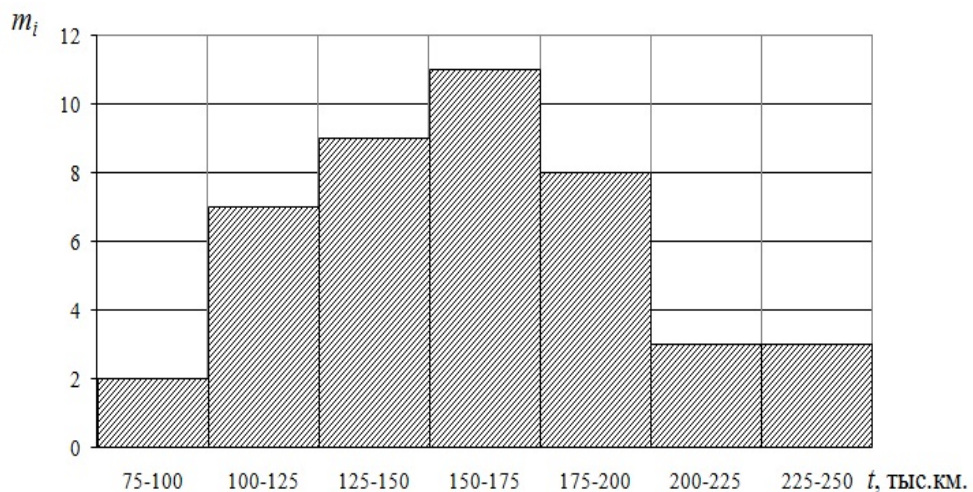


Рис.1. Гистограмма распределения отказов вкладышей коренных шеек коленчатого вала по наработке

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

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 | | | | $\chi^2_{\text{опыт.}} = 2,317$ |

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

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

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

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

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

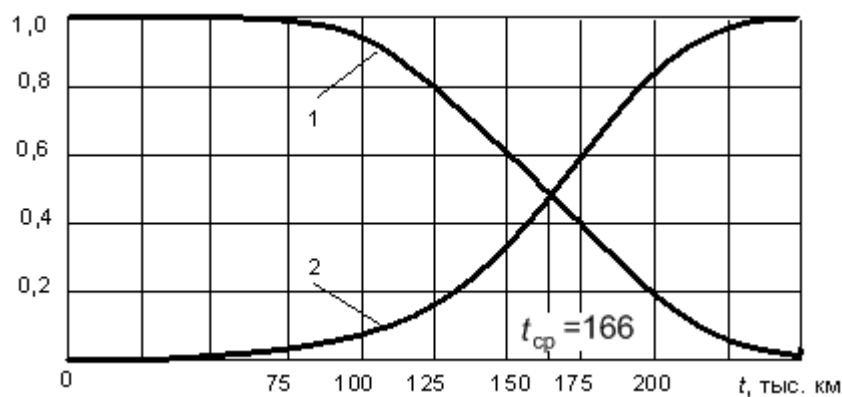


Рис. 2. График функции вероятности безотказной работы (1) и вероятности отказов (2) вкладышей шеек коленчатого вала

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 $F(t)$.

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 № 5

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Цель работы – изучить:

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

Общие сведения

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

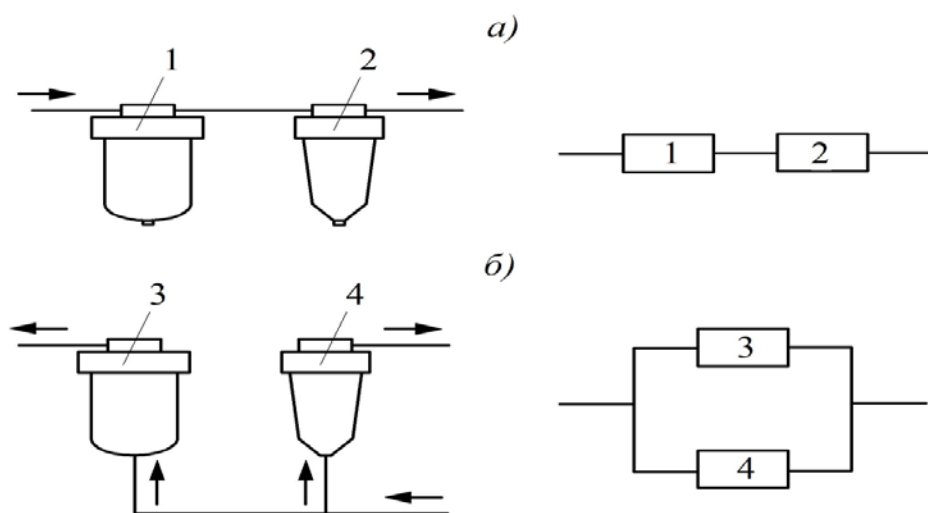


Рис. 1. Схемы соединения фильтров:
а - в системе питания; *б* - в системе смазки

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

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

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

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

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

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

В соответствии с ГОСТ 27.002 – 89 **резервирование** – это способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых

функций. Если избыточность достигается использованием дополнительных элементов структуры объекта, то такое резервирование называют структурным.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

тормозов, а второй – колесные цилиндры левого переднего и правого заднего тормозных механизмов.

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

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

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

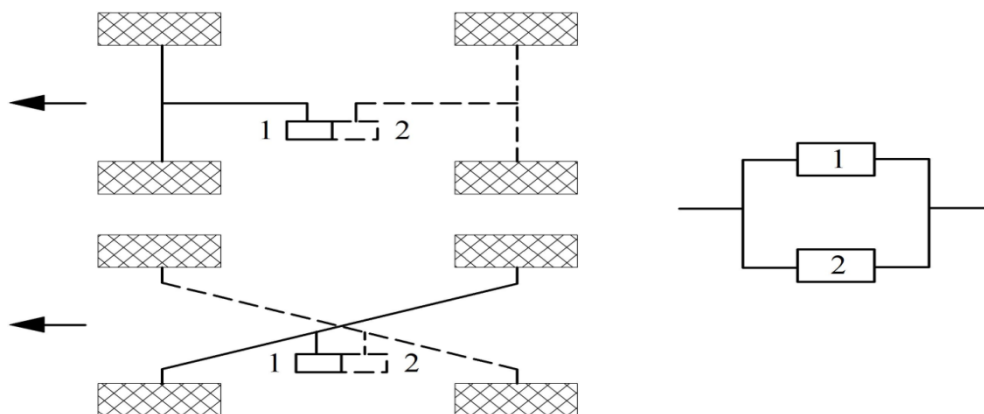


Рис. 2. Схемы тормозных систем с осевым (а) и диагональным (б) разделением контуров

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

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

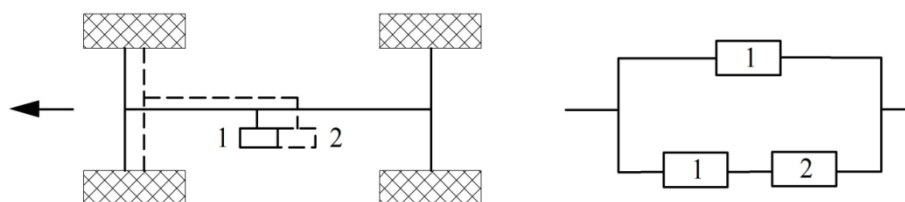


Рис. 3. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура

Вероятность безотказной работы тормозной системы, выполненной по такой схеме 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:

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

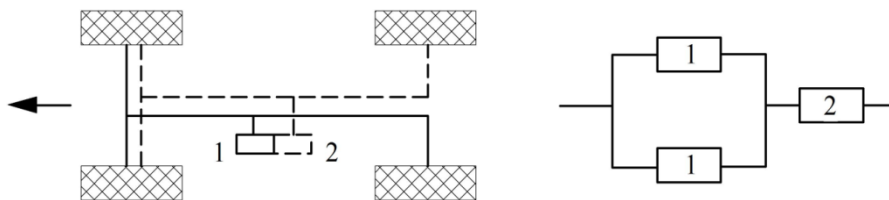


Рис. 4. Схема тормозной системы с резервированием переднего контура и одного из цилиндров задних колес

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

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

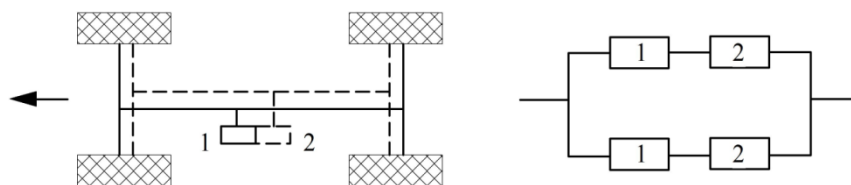


Рис. 5. Схема тормозной системы с общим резервированием

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

Оценка надежности тормозных систем

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

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

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

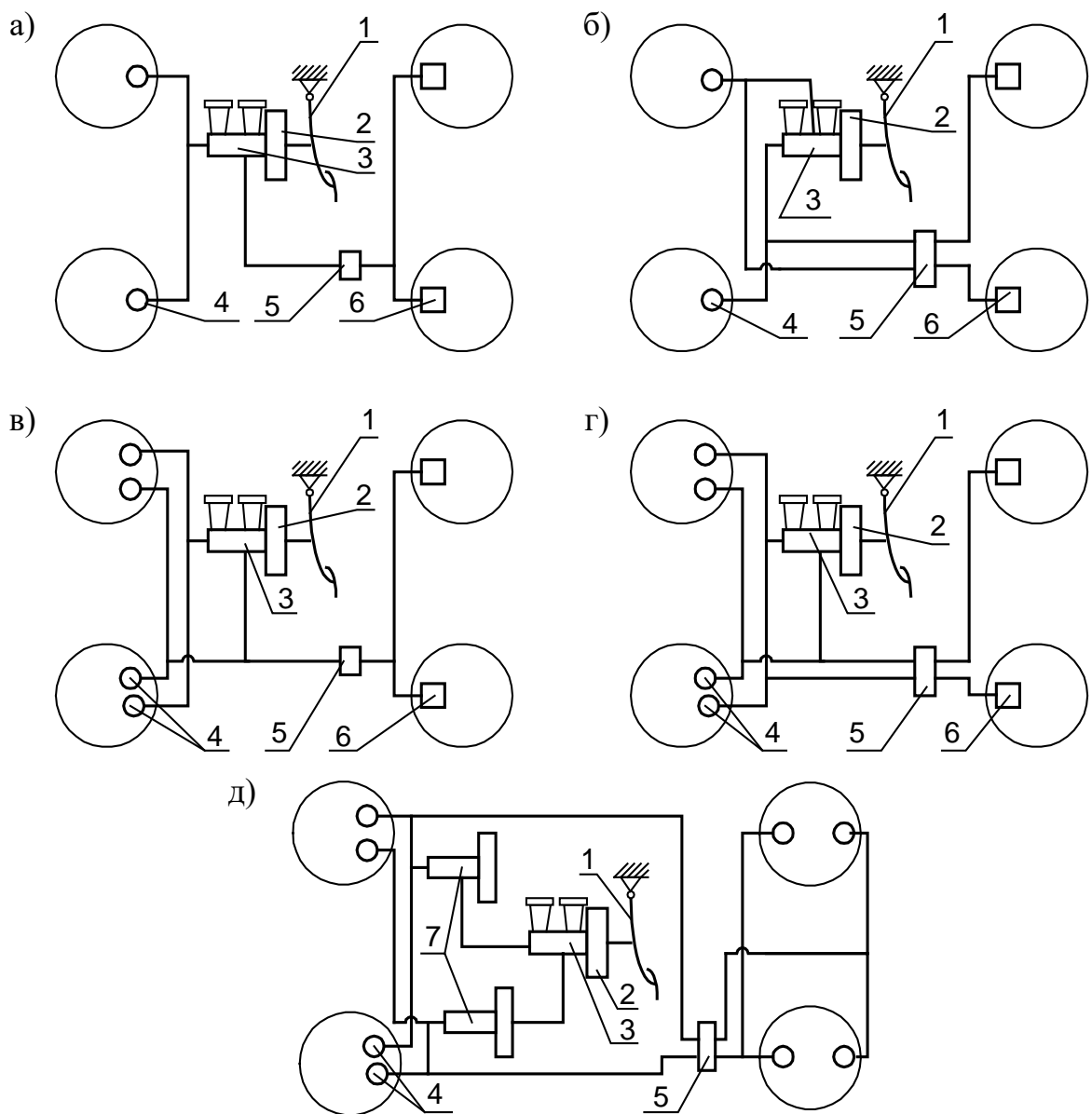


Рис.6. Двухконтурные тормозные системы автомобилей (гидравлический тормозной привод): а – двухконтурная система с разделением по осям; б – двухконтурная диагональная система; в – система с резервной подсистемой; г – с резервной системой; д – с полным дублированием. Обозначения: 1 – тормозная педаль; 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 основной системы, так и дополнительной резервной. Рабочие тормозные цилиндры отдельные. Регулятор тормозных сил 5 включен в основную подсистему.

Схема г). Тормозная система также двухконтурная с резервированием. Обе подсистемы по своей эффективности равнозначны. В каждую из них входит секция главного

тормозного цилиндра 3, по одному рабочему цилиндру в обоих передних тормозных механизмах, секция регулятора тормозных сил и один тормозной механизм задних колес.

Схема д). Тормозная система зарезервирована в наибольшей степени. Параллельно подсистемам передних и задних тормозов включены такие же, поэтому деление подсистем на основные и резервные теряет смысл. Конструктивно это обеспечивается тем, что тормозные механизмы всех колес дисковые. Резервированы и усилители – помимо основного в каждой подсистеме имеются дополнительные усилители 7. Основное преимущество этой схемы состоит в том, что отказ любого элемента тормозной системы не отражается на тормозных свойствах автомобиля.

Выполнение работы

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

Продолжительность работы 4 часа.

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие сведения:

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

Контрольные вопросы

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

Работа № 6

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

стью 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.

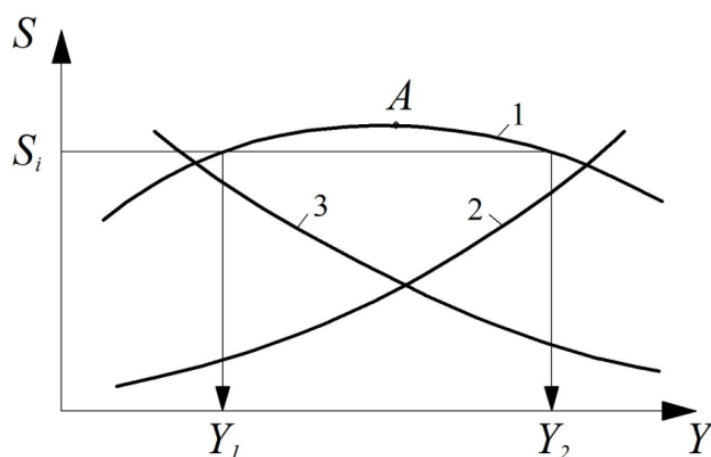


Рис. 1. Закономерности изменения диагностических параметров: 1 – не обладающий однозначной зависимостью (имеется экстремум в точке A); 2 и 3 – обладающие однозначной зависимостью

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

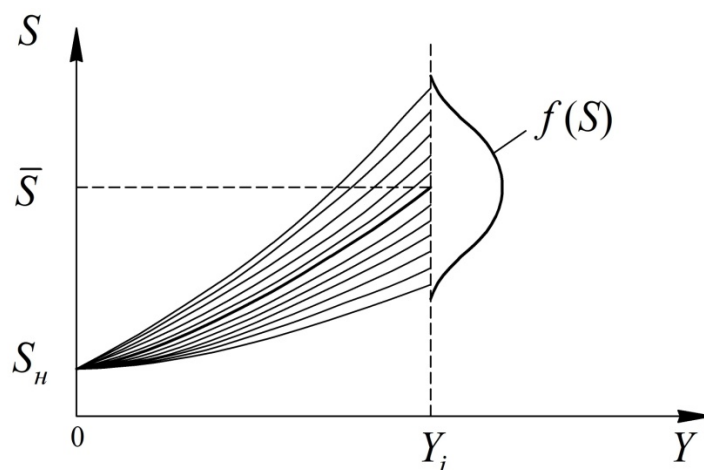


Рис. 2. Рассеивание результатов измерения диагностического параметра

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. $\varphi_1 > \varphi_2$.

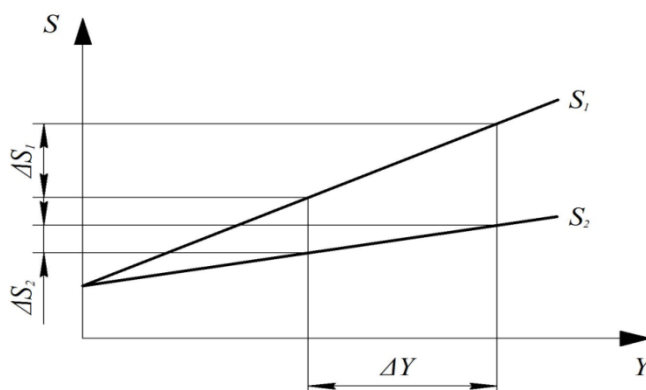


Рис. 3. Схема определения чувствительности диагностических параметров

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).

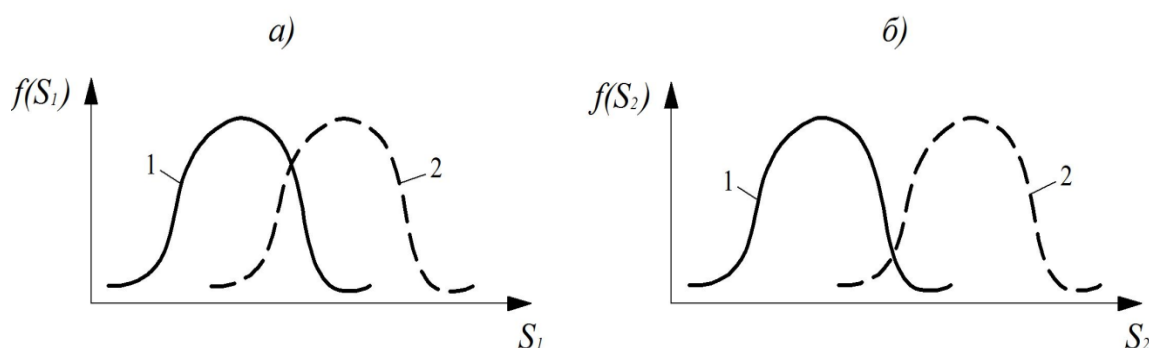


Рис.4. Распределение значений малоинформативного S_1 и высокоинформативного S_2 диагностических параметров: 1, 2 – исправное и неисправное состояния объектов

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 $S_{п}$ 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 $S_{д}$ представляет собой жесточайшую 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.

К *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:

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

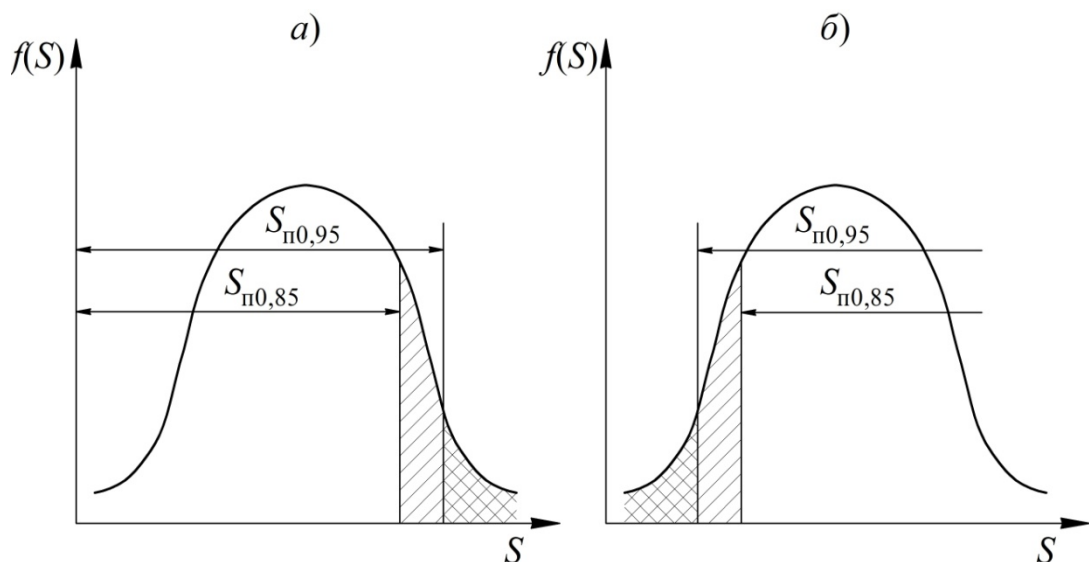


Рис. 5. Схема определения предельных нормативов диагностических параметров

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 состоянии, 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.

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

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

Таблица 1. Результаты измерений люфтов в рулевом механизме

| № п/п | $\alpha_{\text{рм}}$ | № п/п | $\alpha_{\text{рм}}$ | № п/п | $\alpha_{\text{рм}}$ |
|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|
| 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 $\alpha_{\text{рм}}$, аппроксимирующий ее теоретический закон (рис.6) и определяем числовые характеристики полученного распределения:

- среднее арифметическое результатов измерений:

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

- среднее квадратичное отклонение:

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

- коэффициент вариации:

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

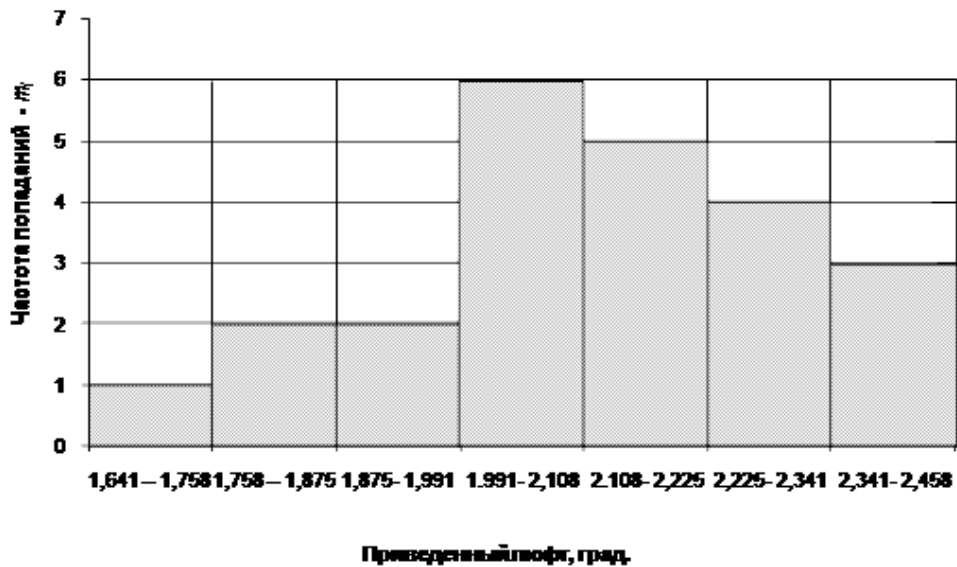


Рис. 6. Гистограмма распределения значений люфта $\alpha_{\text{рм}}$, град.

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)

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

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 ν); 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.

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 № 7

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 $Y_{пр}$.

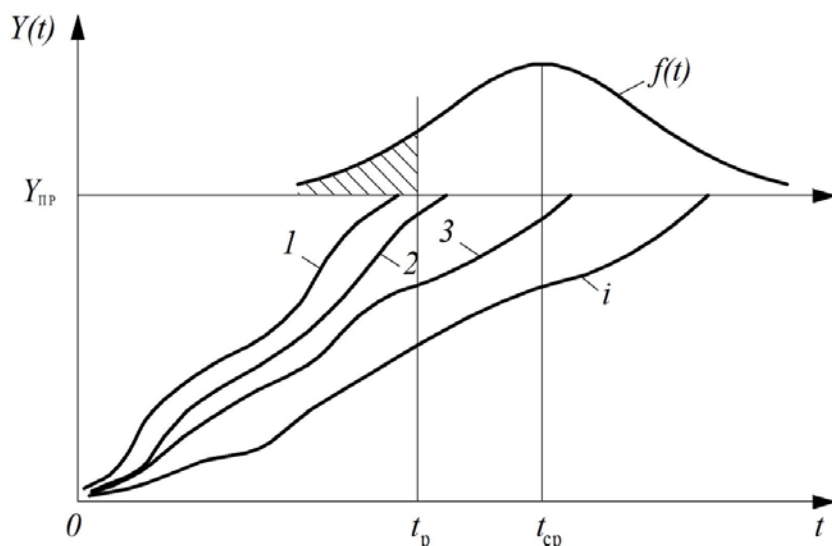


Рис. 1. Графическая интерпретация реализации автомобилем ресурса

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

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

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.

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

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

где S_n – начальное значение диагностического параметра; v – 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.

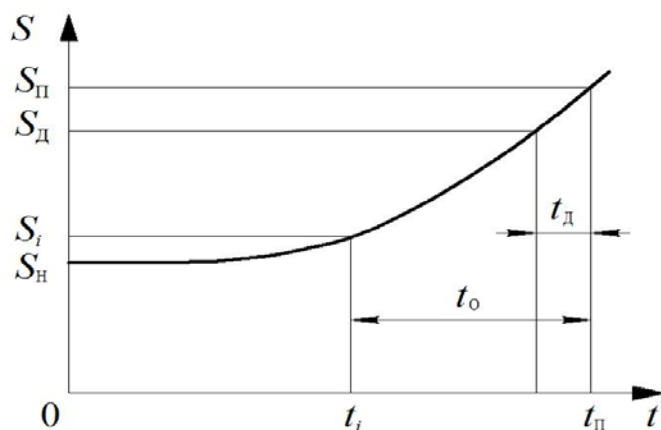


Рис. 2. Схема определения остаточного ресурса по реализации диагностического параметра: S_i, S_n, S_p – текущее, номинальное и предельное значение диагностического параметра; t_i, t_o, t_p – текущий, остаточный и полный ресурс соответственно

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:

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

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, схождение 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.

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 $t_0 = 99$ тыс. км.

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.

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.