

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет

Ю.В. БАЖЕНОВ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Учебное пособие

Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Автомобили и автомобильное хозяйство» «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (по отраслям)» направления подготовки «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования»

Владимир 2006

УДК 629.113.004

ББК 34.414

Б16

Рецензенты

Кафедра эксплуатации транспортных средств
Московского государственного индустриального университета

Доктор технических наук, профессор
Московского автомобильно-дорожного института (ГТУ)

А.П. Болдин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Баженов, Ю.В.

Б16 Основы теории надежности машин : учеб. пособие / Ю.В. Баженов ;
Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. –
160 с. – ISBN 5-89368-655-1.

Рассматриваются основные понятия и определения теории надежности, физическая сущность и закономерности изменения технического состояния машин; факторы, определяющие интенсивность изнашивания; методы получения и анализа информации об отказах и неисправностях; обеспечение надежности машин на этапах проектирования, производства и эксплуатации.

Предназначено для студентов и магистров специальностей 190601 – автомобили и автомобильное хозяйство и 190603 – сервис транспортных и технологических машин и оборудования (в автомобильном транспорте), а также для инженерно-технических работников автотранспортных предприятий.

Ил. 64. Табл. 21. Библиогр.: 20 назв.

УДК 629.113.004

ББК 34.414

ISBN 5-89368-655-1

© Владимирский государственный
университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН	7
1.1. Общие понятия науки о надежности	7
1.2. Термины и определения	10
1.3. Количественные показатели надежности	16
1.3.1. Показатели безотказности	16
1.3.2. Показатели долговечности	20
1.3.3. Показатели ремонтпригодности	21
1.3.4. Показатели сохраняемости	23
1.3.5. Комплексные показатели надежности	23
1.4. Надежность парка автомобилей	24
1.4.1. Моделирование процессов функционирования АП и его надежности.	26
1.4.2. Оценка показателей надежности автопарка по статистическим данным	27
<i>Контрольные вопросы</i>	31
Глава 2. ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ	31
2.1. Основные причины потери машиной работоспособности	32
2.2. Физическая сущность и закономерности изнашивания	37
2.3. Основные факторы, определяющие интенсивность изнашивания	42
2.3.1. Влияние на изнашивание вида трения	42
2.3.2. Зависимость интенсивности изнашивания от давления и скорости относительного перемещения	44
2.3.3. Влияние механических характеристик материалов на изнашивание	46
2.3.4. Влияние на изнашивание качества поверхности детали ..	46
2.3.5. Влияние на изнашивание условий эксплуатации	48
2.4. Предельные и допустимые износы	49
2.5. Методы определения износов	55
<i>Контрольные вопросы</i>	60
Глава 3. ИСПЫТАНИЯ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ	60
3.1. Цель и виды испытаний изделий машиностроения	60

3.2. Испытания автомобилей на надежность	
в процессе их эксплуатации	62
3.2.1. Эксплуатационные испытания	63
3.2.2. Полигонные испытания	64
3.2.3. Специальные испытания	66
3.3. Стендовые испытания	67
3.4. Ускоренные испытания	70
<i>Контрольные вопросы</i>	74
Глава 4. СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
О НАДЕЖНОСТИ МАШИН	74
4.1. Определение объема выборки обследований	74
4.2. Определение выборочных характеристик	77
4.2.1. Числовые характеристики случайной величины	78
4.2.2. Законы распределения случайных величин	79
4.3. Статистическая обработка информации о надежности	85
4.3.1. Порядок обработки опытных данных	85
4.3.2. Проверка гипотезы о принадлежности результатов исследований выбранному закону распределения	89
4.4. Обработка информации по надежности	
при незавершенных испытаниях	101
<i>Контрольные вопросы</i>	104
Глава 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН	
НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,	
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ	105
5.1. Конструктивные методы обеспечения надежности машин	107
5.2. Обеспечение надежности машин при их производстве	119
5.3. Обеспечение надежности машин в эксплуатации	126
5.3.1. Условия эксплуатации автотранспортных средств	127
5.3.2. Организация ТО и ремонта	134
5.4. Техническая диагностика машин	137
5.4.1. Основные понятия. Системы диагностирования	137
5.4.2. Выбор диагностических параметров	141
5.4.3. Нормирование диагностических параметров	145
5.4.4. Прогнозирование остаточного ресурса машин	149
<i>Контрольные вопросы</i>	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	155
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	156

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности машин всегда являлось одной из важнейших задач машиностроения. Особо актуальна эта проблема для отрасли автомобильного транспорта и определяется его интенсивным развитием, ролью в транспортном комплексе страны, необходимостью обеспечения грузовых и пассажирских перевозок 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 конструкций 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.

При эксплуатации автомобиля подавляющее большинство деталей достигают предельного состояния из-за износа. В связи с этим выявление

физических процессов изнашивания, установление зависимостей физико-механических свойств поверхностного слоя детали от режима ее работы, факторов внешней среды позволяют управлять этим процессом, снижать его интенсивность.

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 такой информации позволяет 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. Информация о надежности обрабатывается методами математической статистики по показателям, оценивающим отдельные свойства надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость), 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.

Учебное пособие написано на основе курса лекций по дисциплине «Основы теории надежности и диагностика» и рассматривает комплекс проблем, перечисленных выше. Решение этих проблем имеет прикладное значение, так как способствует рациональной организации технической эксплуатации машин, обоснованию периодичностей и трудоемкостей технических воздействий при ТО и ремонте, снижению трудовых и материальных затрат на поддержание машин в работоспособном состоянии.

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

1.1. Общие понятия науки о надежности

Наука о надёжности изучает закономерности изменения показателей качества машин и на основании этого разрабатывает методы, обеспечивающие необходимый ресурс и безотказность их работы.

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 заканчивается принятием решения о списании.

Надёжность машины закладывается *при проектировании и расчёте*. На этом этапе она зависит от конструкции машины (агрегата, узла, механизма), методов защиты от различных вредных воздействий, системы смазки, приспособленности к выполнению операций ТО и ремонта и других особенностей конструирования.

При производстве (изготовлении) машины показатели надёжности, заданные при конструировании, обеспечиваются. На этом этапе она зависит от качества изготовления деталей, методов контроля выпускаемой продукции, возможности управления технологическими процессами производства, качества сборки, методов испытаний готовой продукции и других элементов процесса изготовления.

При эксплуатации машины заложенная на этапах проектирования и производства надёжность реализуется. Такие свойства, как безотказность, долговечность и ремонтпригодность проявляются только в процессе эксплуатации машины и зависят от принятой системы ТО и ремонта, условий и режимов работы и других эксплуатационных факторов.

Таким образом, проблема надёжности является комплексной проблемой, так как вторгается в сферы конструирования, производства и эксплуатации машин. Поэтому для решения задач обеспечения надёжности привлекаются различные отрасли знаний.

Специфическими особенностями науки о надёжности являются:

– исследование выходных параметров машины во времени (или по наработке) в процессе её эксплуатации;

– прогнозирование технического состояния объекта с точки зрения сохранения значений выходных параметров (показателей качества).

Изменения показателей качества машины в процессе эксплуатации могут быть как абсолютными, так и относительными.

Абсолютное изменение показателей качества связано с различными физическими процессами, действующими на машину и ухудшающими свойства и состояние материалов, из которых она изготовлена (физическое старение).

Относительное изменение показателей качества машин связано с появлением новых, более совершенных, машин, характеристики которых превосходят существующие, хотя в абсолютных значениях они могут и не измениться (моральный износ).

Наука о надёжности изучает изменение показателей качества машин под влиянием тех факторов, которые приводят только к абсолютным изменениям её свойств. Она базируется на двух отраслях знаний: математических методах 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 (топлива, 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».

Физика отказов изучает необратимые процессы, приводящие к потере материалом начальных свойств при эксплуатации изделий. Изучение

этих процессов во времени является базой для решения основных задач надёжности.

Современный уровень развития техники позволяет достичь практически любых показателей качества и надёжности машины. Однако затраты на достижение этой цели могут быть столь высоки, что эффект от повышения уровня надёжности не возместит их, и суммарный результат от проведенных мероприятий будет отрицательным. В связи с этим оценка достигнутого уровня надёжности и необходимость его повышения должна решаться в первую очередь с позиций экономики, так как экономика является основным критерием для решения большинства практических вопросов надёжности.

Сравнение различных вариантов достижения требуемого уровня надёжности должно исходить из условия получения наибольшего суммарного экономического эффекта с учетом затрат в сферах производства и эксплуатации машин и того положительного эффекта, который дает использование машины по назначению.

В общем случае изменение во времени суммарного экономического эффекта при эксплуатации машины происходит под влиянием двух основных факторов (рис. 1.1). С одной стороны, необходимо учитывать затраты на изготовление новой машины $C_{и}$, включая её проектирование, изготовление, испытание, отладку, транспортировку и другое, а также затраты на эксплуатацию $C_{э}(t)$, включая ТО, ремонт, хранение, т.е. всё то, что связано с поддержанием и восстановлением работоспособности машины. При этом $C_{и} + C_{э}(t)$ являются отрицательными в балансе эффективности.

С другой стороны, работа машины дает положительный экономический эффект $C_{р}(t)$, т.е. прибыль.

Изменение $C_{э}(t)$ в функции времени имеет тенденцию к возрастанию, так как износ и старение элементов машины приводят к необходимости вкладывания всё больших средств.

Изменение $C_{р}(t)$, наоборот, имеет тенденцию к уменьшению интенсивности роста, так как более частые простои машины в ремонте и техническом обслуживании снижают её производительность. Поэтому кривая суммарной эффективности $C_{\Sigma}(t) = C_{и} + C_{э}(t) + C_{р}(t)$ имеет максимум и два раза пересекает ось абсцисс t .

Период $t = T_{ок}$, когда машина возвратила затраты, которые в неё были вложены, называется *сроком окупаемости*. С этого момента машина начинает приносить прибыль. Однако прирост получаемого эффекта по-

степенно снижается из-за возрастания эксплуатационных затрат до $t = T_{\text{пр}}$, когда снова $C_{\text{и}} + C_{\text{э}}(t) = C_{\text{р}}(t)$. При $t > T_{\text{пр}}$ затраты на эксплуатацию превышают тот экономический эффект, который может обеспечить машина.

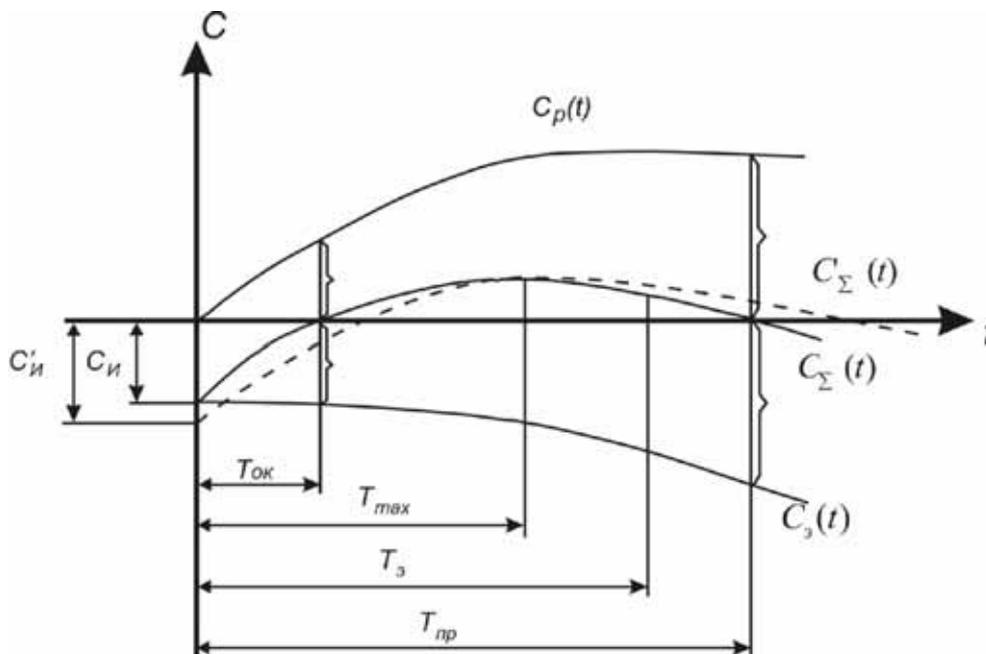


Рис. 1.1. Изменение экономической эффективности машины во времени

Длительность экономически целесообразной эксплуатации машины $T_{\text{э}}$ находится в диапазоне между $T_{\text{мах}}$ и предельным сроком её службы $T_{\text{пр}}$, т.е. $T_{\text{мах}} < T_{\text{э}} < T_{\text{пр}}$.

Выбор варианта с позиции надёжности должен исходить из сравнения затрат на изготовление, эксплуатацию и экономического эффекта, полученного при работе машины. Например, при более высокой первоначальной стоимости машины $C_{\text{и}}'$ экономический эффект от её работы $C_{\Sigma}'(t)$ выше за счет улучшения показателей надёжности.

1.2. Термины и определения

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. Применительно к автомобилям основными свойствами являются: грузоподъёмность, вместимость, маневренность, безопасность, динамичность, производительность, эколо-

гичность и т. д., закладываемые при проектировании и производстве автомобиля.

Под качеством автомобиля понимается совокупность свойств, определяющих степень его пригодности к выполнению заданных функций при использовании по назначению.

Каждое из этих свойств оценивается одним или несколькими *параметрами*, которые в процессе эксплуатации принимают различные количественные значения, именуемые *показателями*. Таким образом, при анализе и оценке качества последовательно рассматривается следующая цепочка (рис. 1.2):

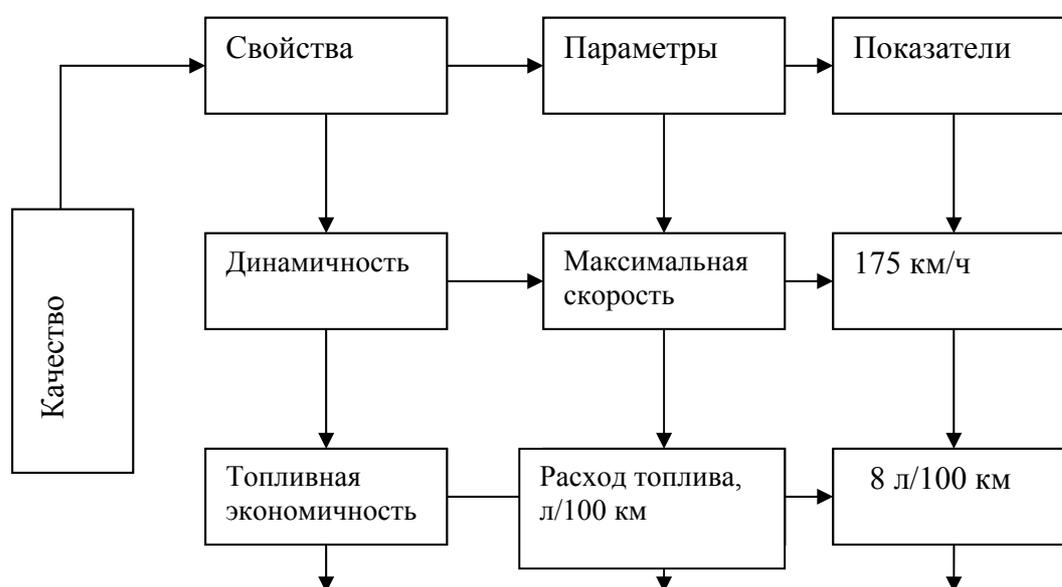


Рис.1.2. Структура понятия качества

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

Надёжность – это свойство любого изделия, в том числе и автомобиля, 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).

Эксплуатационные показатели автомобиля по мере увеличения наработки изменяются от начальных до предельных значений, соответственно изменяется и его техническое состояние. При этом следует различать следующие пять основных видов технического состояния автомобиля:

- исправное;
- работоспособное;
- неисправное;
- неработоспособное;
- предельное.

Переход автомобиля из одного состояния в другое (т.е. нижестоящее) происходит вследствие повреждений или отказов.

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. Поддержание исправного состояния, безусловно, требует определённых эксплуатационных затрат на выполнение предусмотренных работ по ТО и ремонту, включая контроль и диагностику.

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

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

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 или необходимостью проведения капитального ремонта.

Совокупность фактических состояний изделий составляет так называемый *жизненный цикл*, протекающий во времени (или по наработке) и

имеющий вполне определённые закономерности, изучаемые в теории надёжности.

Центральным понятием в теории надёжности является *отказ*, под которым понимается полная или частичная потеря объектом (автомобилем, агрегатом, узлом, системой) работоспособности. Для предупреждения отказов необходимо знать причины их возникновения и проявления, а также влияние на работоспособность автомобиля. В зависимости от этих факторов рекомендуется следующая классификация основных отказов автомобилей.

По источнику и причинам возникновения отказы подразделяются на конструктивные, производственные и эксплуатационные.

Конструктивные отказы возникают по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования. Главным образом они обусловлены недостатками конструкции автомобиля. Например, неудачно выполнена конструктивная схема, не учтены условия эксплуатации, детали плохо защищены от попадания абразивов и влаги.

Производственные отказы возникают из-за несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

Эксплуатационные отказы связаны с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации.

По характеру изменения параметров технического состояния отказы подразделяются на постепенные и внезапные.

Постепенными называют отказы, которые возникают в результате протекания того или иного процесса старения, ухудшающего начальные параметры элементов автомобиля. Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $P(t)$ в течение заданного пробега от t_1 до t_2 зависит от длительности предыдущей работы (рис. 1.3, а).

Чем больше наработка автомобиля, тем выше вероятность возникновения отказа, т.е.

$$P(t_2 + \Delta t) > P(t_1 + \Delta t) \text{ при } t_2 > t_1.$$

Это связано с тем, что в процессе эксплуатации по мере выработки заложенной долговечности происходит накопление необратимых изменений объекта, обусловленных износом и старением материалов, накоплением усталостных повреждений, а также коррозионными, эрозионными и

другими воздействиями. К этому виду отказов относится большинство отказов автомобиля.

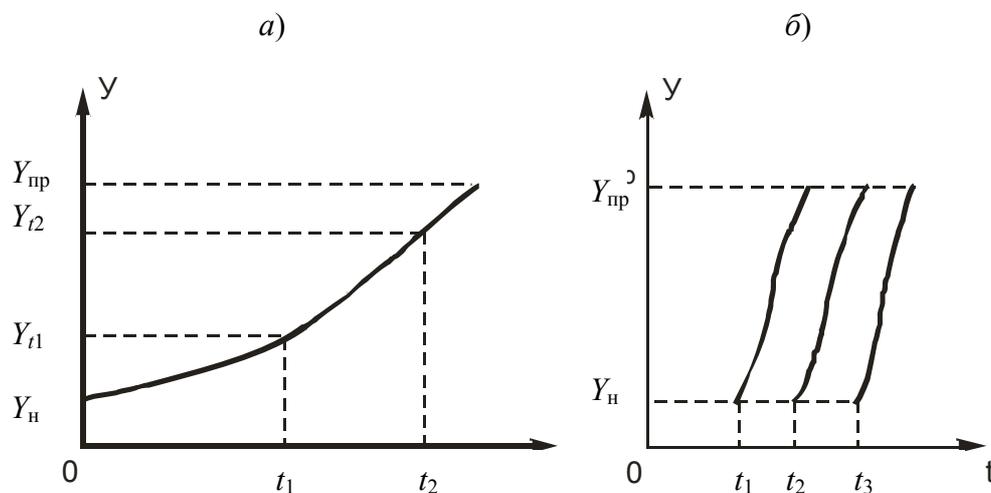


Рис. 1.3. Изменение параметра технического состояния Y по наработке t при постепенных (а) и внезапных (б) отказах:
 Y_n ; $Y_{пр}$ – начальное и предельное значения параметров

Внезапные отказы возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности элемента автомобиля к их восприятию.

Такой отказ возникает через некоторую наработку t_b (рис. 1.3, б), которая является случайной величиной и вероятность его возникновения $P(t)$ в течение заданного периода от t_1 до t_2 не зависит от длительности предыдущей эксплуатации, т.е. $P(t_1 + \Delta t) \approx P(t_2 + \Delta t)$.

Примерами таких отказов могут служить тепловые трещины, возникающие в деталях вследствие прекращения подачи смазки, деформаций и поломок деталей, попавших в такие условия работы, когда каждый параметр принимает экстремальное значение (наибольшая нагрузка, минимальная твёрдость, повышенная температура и т.д). Выход из строя при этом происходит, как правило, внезапно, без предшествующих симптомов.

По своим последствиям отказы подразделяются на отказы функционирования и параметрические.

Отказы функционирования приводят к тому, что автомобиль или какой-либо его агрегат, узел не может выполнять свои функции. Например, в результате отказа системы питания или зажигания двигатель не заводится, насос не подаёт масло и т.д.

Параметрический отказ приводит к выходу параметров (характеристик изделия) за допустимые пределы. Такие отказы, например, как сни-

жение мощности, топливной экономичности, увеличение зазоров в сопряжениях не ограничивают дальнейшую эксплуатацию автомобиля, однако выполняемые им функции не удовлетворяют требованиям экономичности, точности и эффективности.

По месту возникновения отказы подразделяются на линейные и выявленные в нерабочее время автомобиля.

Линейные отказы возникают в режиме рабочего времени и нарушают транспортный процесс.

Отказы, выявленные в нерабочее время, обнаруживаются, как правило, при техническом обслуживании и диагностировании автомобиля и своевременно устраняются, не нарушая транспортный процесс.

Надёжность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетаний более простых свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохранности.

Безотказность – это свойство автомобиля непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Следовательно, безотказность определяет непрерывную работу автомобиля без каких-либо вмешательств для поддержания работоспособности (т.е. технических обслуживаний и ремонтов).

Долговечность – это свойство автомобиля сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Таким образом, долговечность автомобиля анализирует его работу за весь период эксплуатации и учитывает, что длительная работа невозможна без ремонтных и профилактических мероприятий.

Ремонтпригодность – это свойство автомобиля, определяющее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонта.

Это свойство, с одной стороны, характеризует качество конструкторских решений по предупреждению и обнаружению возможных отказов и, с другой, какой ценой по трудовым затратам обеспечивается требуемый уровень надёжности изделия. В технической эксплуатации автомобилей под ремонтпригодностью (в узком значении) понимают просто приспособленность изделий к ремонту.

Сохраняемость – это 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. Это свойство зависит от качества изготовления, интенсивно-

сти протекания в элементах автомобиля процессов старения, а также таких внешних факторов, как температура и влажность воздуха, агрессивность окружающей среды и др.

1.3. Количественные показатели надежности

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 для оценки надёжности применяются количественные показатели её отдельных свойств (безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости), а также комплексные показатели, характеризующие готовность и эффективность использования изделий. Показатели надёжности количественно характеризуют, в какой степени конкретному изделию присущи определённые свойства, обуславливающие его надёжность. Они могут иметь размерность (например наработка на отказ в тысячах километров) или не иметь её (например вероятность безотказной работы).

1.3.1. Показатели безотказности

Для количественной оценки безопасности используют следующие показатели:

- вероятность безотказной работы;
- среднюю наработку на отказ для восстанавливаемых и среднюю наработку до отказа для невосстанавливаемых изделий;
- параметр потока отказов для восстанавливаемых и интенсивность отказов для невосстанавливаемых изделий.

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. При назначении или определении этого показателя указывается наработка, в течение которой его значение должно быть в пределах заданной величины.

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, например, $P(t)$ какого-либо изделия (автомобиля, отдельного агрегата, системы) на пробеге 0 – 50 тыс. км равна 0,95, это означает, что из большого их количества в среднем около 5 % потеряют свою работоспособность на этом пробеге. Остальные же 95 % не будут иметь ни одного отказа.

Показатель $P(t)$ может быть использован и для оценки безотказности одного изделия. В этом случае он определяет шансы изделия проработать без отказов заданный пробег.

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

$$P(t) + F(t) = 1. \quad (1.1)$$

С увеличением пробега автомобиля вероятность его безотказной работы уменьшается и соответственно увеличивается вероятность отказа (рис. 1.4).

Функция $P(t)$ позволяет применительно к отдельно взятому элементу конструкции предвидеть и количественно оценить возможность отказа на том или ином пробеге. Она определяется из выражения

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt, \quad (1.2)$$

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

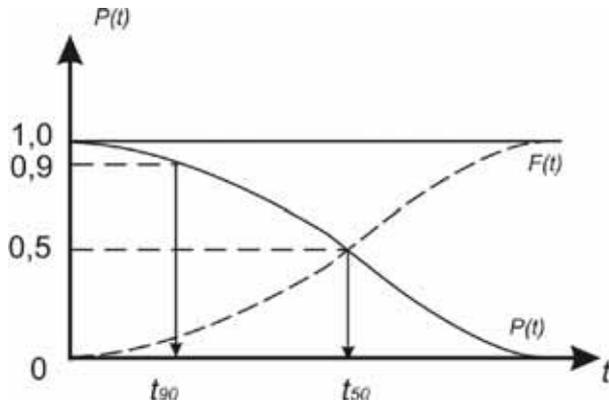


Рис. 1.4. Изменение вероятностей безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$ по наработке t

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 :

$$\bar{P}(t) = \frac{N - \sum_{j=1}^r m_j}{N}, \quad (1.3)$$

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.

Наработка на отказ – это среднее значение наработки восстанавливаемого изделия между отказами. Статистически этот показатель определяется отношением суммарной наработки изделия к числу отказов в течение этой наработки

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{T}{n}, \quad (1.4)$$

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

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

$$\bar{t} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_r t_r}{m_1 + m_2 + \dots + m_r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r m_j t_j, \quad (1.5)$$

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

Средняя наработка до отказа – это среднее значение наработки невосстанавливаемых изделий до первого отказа. Статистически этот показатель определяется отношением суммы наработок испытуемых объектов до первого отказа к их количеству. Если довести испытания до момента, когда все испытуемые изделия отказали, то средняя наработка до отказа определяется по формуле

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j, \quad (1.6)$$

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

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Определение этого показателя базируется на понятии *плотности вероятности отказа* в момент времени t , под которой понимается предел отношения вероятности отказа в интервале времени от t до $t + \Delta t$ к величине этого интервала Δt при $\Delta t \rightarrow 0$. Физический смысл плотности вероятности отказа – это вероятность отказа в достаточно малую единицу времени:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t}. \quad (1.7)$$

Из определения интенсивности отказов $\lambda(t)$ следует, что

$$P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t)\Delta t, \quad (1.8)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы за время t ; $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа.

Из этого соотношения интенсивность отказов определяется выражением

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (1.9)$$

Статистическая оценка этого показателя находится по формуле

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (1.10)$$

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

Из выражения (1.10) 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

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M \{m(t + \Delta t) - m(t)\}}{\Delta t}, \quad (1.11)$$

где Δt – малый отрезок наработки; $m(t)$ – число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки t ; разность $m(t + \Delta t) - m(t)$ представляет собой число отказов на отрезке Δt .

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

$$\bar{\omega} = \frac{m(t_2) - m(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (1.12)$$

По сравнению с формулой (1.11) здесь рассматривается число отказов за конечный отрезок времени (t_1, t_2) , причем $t_1 \leq t \leq t_2$.

Изменение параметра потока отказов $\omega(t)$ протекает в основном в соответствии с рис. 1.5. На участке I происходит нарастание потока отказов, которое связано с выходом из строя деталей и узлов, имеющих дефекты изготовления и сборки (участок приработки). На участке II потоки отказов можно считать постоянными, это участок нормальной эксплуатации машины, на котором происходят, главным образом, внезапные отказы.

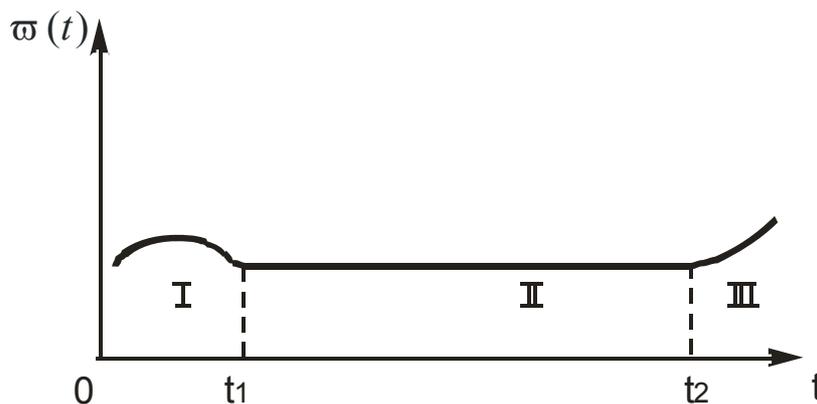


Рис. 1.5. Изменение потока отказов ω по наработке t

На участке III параметр потока отказов $\omega(t)$ резко возрастает вследствие износа большинства узлов и деталей машины, в том числе базовых. В этот период машины обычно направляют или в капитальный ремонт, или на списание.

Наиболее продолжительным периодом работы машины является участок II, на котором параметр потока отказов остается почти на одном уровне при постоянных условиях эксплуатации, т. е. $\omega(t) = \text{const}$. Поэтому среднее число отказов на этом участке может быть определено по формуле

$$m_{\text{cp}}(t) = \omega(t)t. \quad (1.13)$$

Наработка на отказ \bar{t} за любой период работы Δt на II участке равна

$$\bar{t} = \frac{1}{\omega(t)} = \text{const}. \quad (1.14)$$

1.3.2. Показатели долговечности

Для оценки долговечности машин используются следующие показатели:

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

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

Применительно к автомобильной технике различают средний ресурс до списания, средний ресурс до капитального ремонта и средний ресурс между капитальными ремонтами.

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.

Средний ресурс определяется по формуле

$$\bar{T}_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad (1.15)$$

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. γ -процентный ресурс легко определяется по графику вероятности безотказной работы $P(t)$ (рис. 1.6, а).

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

Для партии изделий γ -процентный ресурс представляет собой наработку, которую имеют или превышают обусловленный процент изделий γ (рис. 1.6, б). Вертикальная линия с абсциссой, равной γ -процентному ресурсу, рассекает площадь под кривой $f(t)$ на две области: справа находится область, площадь которой равна вероятности работы без нарушения работоспособного состояния, а слева – область, площадь которой равна вероятности работы с возможными отказами.

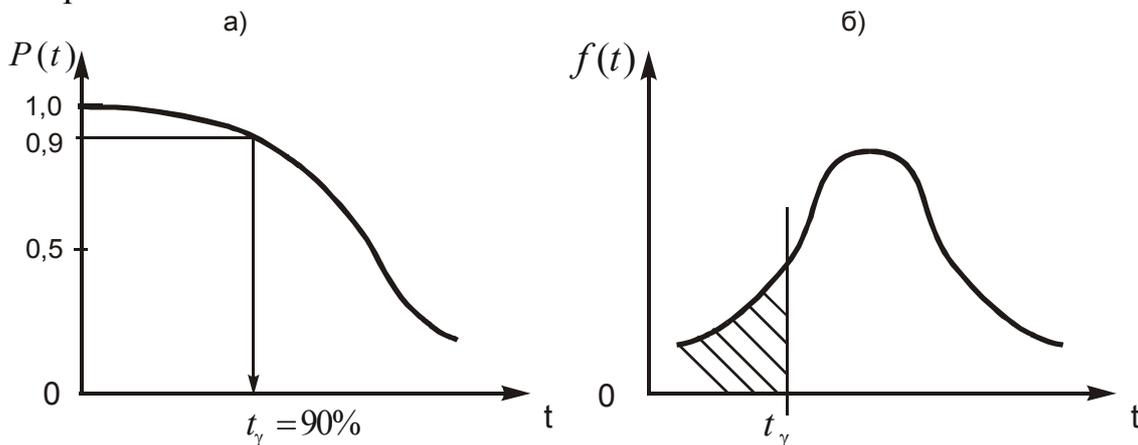


Рис. 1.6. Схема определения γ -процентного ресурса

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

$$1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (1.16)$$

1.3.3. Показатели ремонтпригодности

Для оценки ремонтпригодности изделий служат следующие основные показатели:

- вероятность восстановления отказа в заданное время;
- среднее время восстановления отказа;
- средняя трудоемкость восстановления.

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

Среднее время восстановления – это математическое ожидание времени восстановления работоспособности изделия после отказа, по существу, среднее время простоя, вызванное отказом. При этом следует учитывать не только чистое время ремонта, но и время, затрачиваемое на поиск причин отказа.

Если на поиск причин отказов и их устранение затрачено время t_1, t_2, \dots, t_m , то среднее время восстановления определяется по формуле

$$\bar{t}_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i, \quad (1.17)$$

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.

Статистическая оценка средней трудоемкости восстановления отказа вычисляется по формуле, аналогичной формуле (1.17), только вместо времени восстановления подставляется трудоемкость в человеко-часах.

Для комплексной оценки ремонтпригодности автомобилей кроме перечисленных показателей дополнительно используют удельную продолжительность, удельную трудоемкость и удельную стоимость ТО и ремонтов.

Удельная продолжительность ТО и ремонтов – это математическое ожидание суммарной продолжительности технических обслуживаний и ремонтов, отнесенное к единице наработки.

В течение заданной наработки машины, например до капитального ремонта, для поддержания ее работоспособности многократно выполняются различные виды профилактических и ремонтных работ. Для определения этого показателя необходимо установить методом хронометража суммарное время на ТО и ремонты и разделить его на ту наработку, в течение которой проводился контроль

$$\bar{\tau}_{\text{ТО-ТР}} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{i\text{ТО-ТР}}}{NT}, \quad (1.18)$$

где $\bar{\tau}_{\text{ТО-ТР}}$ – удельная продолжительность ТО и ремонтов, ч/1000 км; $\tau_{i\text{ТО-ТР}}$ – продолжительность простоя i -го объекта в ТО и ремонтах в течение назначенной наработки T , ч; N – число объектов, находившихся под наблюдением.

Удельные трудоемкости и стоимости ТО и ремонтов определяются аналогичным образом с той лишь разницей, что вместо времени на выполнение работ в формулу подставляются трудоемкости в человеко-часах или стоимости в рублях.

Показатели ремонтпригодности, как нетрудно заметить, сводятся к оценке простоев машин в технических обслуживаниях и ремонтах и затрат на их выполнение. Зависят они от удобства доступа к объектам ремонта и обслуживания, легкосъемности агрегатов, узлов и деталей, степени их взаимозаменяемости и унификации, контролепригодности и др.

1.3.4. Показатели сохраняемости

Сохраняемость машин оценивается показателями, аналогичными тем, которые применяются для оценки долговечности:

- средний срок сохраняемости;
- гамма-процентный срок сохраняемости.

Срок сохраняемости представляет собой календарную продолжительность хранения и транспортировки объекта в заданных условиях, в течение и после которой сохраняются значения эксплуатационных показателей в установленных пределах.

Гамма-процентным сроком сохраняемости называют срок сохраняемости, который будет достигнут изделием с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Эти показатели обычно оценивают сохраняемость объектов, подвергнутых консервации и находящихся на складах в качестве запасных частей. Они могут характеризовать как автомобиль в целом, так и отдельные его элементы (аккумуляторные батареи, шины, масла, краски и др.)

При соблюдении технологии хранения и консервации изделия должны отвечать всем требованиям, предъявляемым к ним техническими условиями после обусловленного срока хранения. Например, если 90%-й срок сохраняемости изделия равен двум годам, то после двухлетнего срока хранения 90 изделий из 100 будут полностью соответствовать требованиям технической документации.

1.3.5. 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_{Γ} – вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается:

$$K_{\Gamma} = \frac{t\Sigma_{\text{pc}}}{t\Sigma_{\text{с}}} = \frac{t\Sigma_{\text{pc}}}{t\Sigma_{\text{pc}} + t\Sigma_{\text{p}}}, \quad (1.19)$$

где $t\Sigma_{\text{pc}}$ – суммарное время пребывания изделия в работоспособном состоянии в интервале наработки между плановыми ТО; $t\Sigma_{\text{p}}$ – суммарные простои в ремонте.

Коэффициент технического использования $K_{\text{т.и}}$ представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период:

$$K_{\text{т.и}} = \frac{t\Sigma_{\text{pc}}}{t\Sigma_{\text{pc}} + t\Sigma_{\text{p}} + t\Sigma_{\text{ТО}}}, \quad (1.20)$$

где $t\Sigma_{\text{pc}}$ – суммарное время нахождения изделия в работоспособном состоянии на заданной наработке; $t\Sigma_{\text{p}}$, $t\Sigma_{\text{ТО}}$ – суммарные простои изделия из-за отказов (в ремонтах) и при профилактических технических обслуживаниях за эту наработку соответственно.

Таким образом, коэффициент технического использования представляет собой вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени на заданной наработке.

Как видно из сравнения K_{Γ} и $K_{\text{т.и}}$, коэффициент готовности – это тот же коэффициент технического использования, но определяемый за период между плановыми ТО.

1.4. Надежность парка автомобилей

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

На работу АП и его надежность оказывает влияние большое число факторов: *технических* (надежность автомобилей и их возраст, количество и качество запасных частей и эксплуатационных материалов, обеспеченность и состояние гаражного оборудования и др.); *технологических* (пе-

риодичность и качество выполнения ТО, качество ТР, соответствие числа постов ТО и ТР потребностям и др.); *организационных* (система снабжения запасными частями и агрегатами, простои по различным причинам и др.); *социальных* (обеспеченность кадрами и их текучесть, квалификация и стаж работы водителей и ремонтных рабочих, невыход на работу водительского и ремонтного персонала и др.); *дорожных и погодно-климатических* (состояние и обустройство дорог, температура, влажность, запыленность и др.). Действие совокупности перечисленных факторов приводит к тому, что надежность одного автомобиля не совпадает с надежностью всего парка машин.

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

1. Автомобиль является изделием, обладающим конечным ресурсом, в то время как АП – это непрерывно обновляемая система за счет списания выработавших ресурс и введения новых автомобилей.

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

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

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

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

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

Надежность среднесписочного автомобиля с достаточной точностью характеризует коэффициент технической готовности α_T (относительное число работоспособных автомобилей). Обобщенную оценку надежности АП дает относительное число автомобилей, направленных заказчику – α_B (коэффициент выпуска автомобилей на линию).

Разница между α_T и α_B обусловлена преимущественно простоями автомобилей по организационно-техническим и организационным причинам.

1.4.1. Моделирование процессов функционирования АП и его надежности

В соответствии с положением о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобиль в парке может находиться в одном из следующих технологических состояний:

- работоспособном (на линии);
- технического обслуживания (ТО-1 или ТО-2);
- текущего ремонта (ТР);
- списания после выработки нормативного ресурса

В действительности в зависимости от организации эксплуатации и других факторов технологические состояния автомобиля более разнообразны.

Эти состояния с точки зрения надежности АП можно разбить на линейные, когда автомобиль работоспособен и поступает на линию, и нелнейные, когда автомобиль неработоспособен или работоспособен, но по различным организационно-техническим и организационным причинам на линию не поступает, поэтому должен числиться отказавшим.

Простои по организационно-техническим причинам могут быть вызваны ожиданиями: ТО-2, ТР, списания; подготовкой нового автомобиля к эксплуатации; доводкой и обкаткой капитально отремонтированных агрегатов и узлов на автомобиле; простоями автомобилей после ДТП, аварии. Простои по организационным причинам связаны с отсутствием заказчика транспортных услуг, горюче-смазочных материалов, шин, аккумуляторных батарей, водителей, ремонтных рабочих по причине неукomплектованности штатов, болезней, отпусков или выходных дней.

При анализе надежности АП удобно использовать граф возможных состояний автомобилей, учитывающий принятую в конкретном АТП систему эксплуатации. Один из возможных вариантов обобщенного графа состояний автомобилей представлен на рис. 1.7. В соответствии с графиком производственного процесса автомобиля помимо работы на линии (состояние S_1) проходят общее Д-1 и углубленное Д-2 диагностирования (состояния S_3 и S_4), плановые ТО-1 и ТО-2 (состояния S_5 и S_7), текущий ремонт (состояние S_6). В случае занятости постов ТО, ремонта или диагностирования автомобиля простаивают в ожидании обслуживания (состояние S_2), а исправные автомобили направляются в зону хранения (состояние S_8).

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

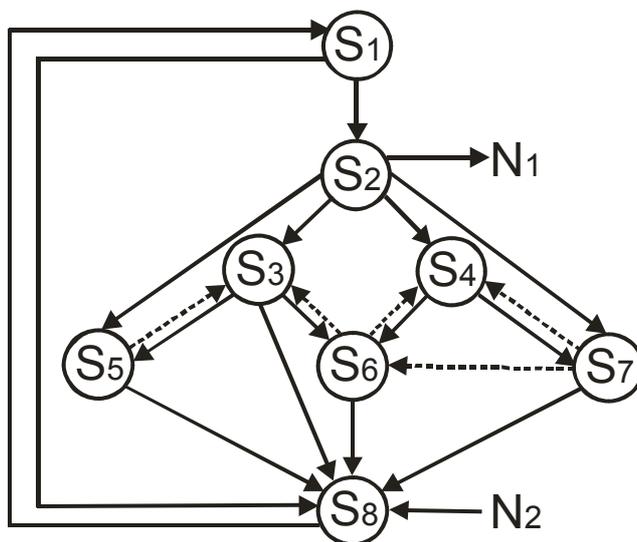


Рис. 1.7. Обобщенный граф возможных состояний автомобилей

С точки зрения организации эксплуатации автомобилей и оценки надежности АП необходимо прежде всего установить численность автомобилей в каждом из состояний и вероятность нахождения в каждом из них. Такие задачи решаются различными методами: статистического анализа, теории массового обслуживания, имитационного моделирования и др. Более точную и достоверную оценку позволяет получить метод статистического анализа, так как он основан на базе существующей системы учета и оценок работы АП.

1.4.2. Оценка показателей надежности автопарка по статистическим данным

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

Рассмотрим метод статистического анализа показателей надежности АП на примере.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за техническим состоянием автомобилей конкретного АТП были получены следующие статистические данные (табл. 1.1).

Таблица 1.1

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

На основе данных табл. 1.1 о списочном количестве, выпуске на линию, простоях по различным причинам построим вначале граф состояний автомобиля (рис. 1.8). Граф включает в себя следующие состояния: работу на линии – Л, простои в техническом обслуживании – ТО, простои в ремонте – ТР, простои по организационно-техническим причинам – ОТП, простои по организационным причинам – ОП.

Обобщенной характеристикой работы АП является вероятность пребывания автомобилей на линии. Для установившегося режима эксплуатации можно принять отношение математического ожидания числа автомобилей, соответствующего состоянию Л, к среднесписочному числу авто-

мобилей в АТП, равным коэффициенту выпуска автомобилей на линию α_B ; отношение суммы математических ожиданий автомобилей по состояниям Л и ОП к среднесписочному числу автомобилей – коэффициенту технической готовности α_T .

Обработка статистических данных табл. 1.1 может быть выполнена на ЭВМ по программе, алгоритм которой представлен на рис. 1.9.

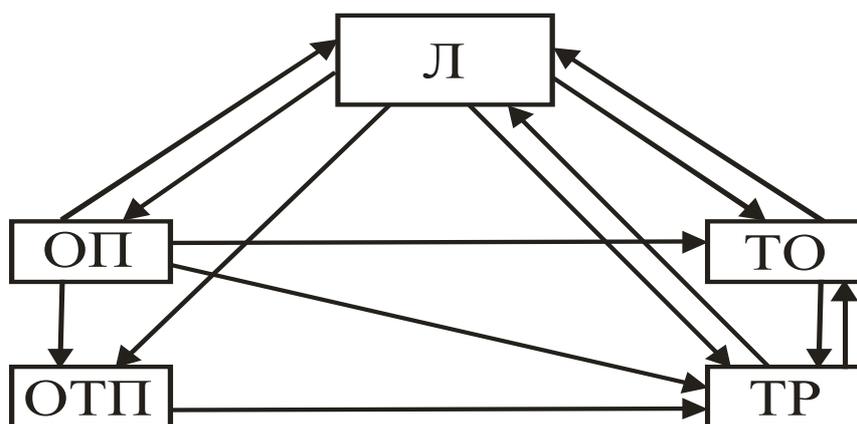


Рис. 1.8. Граф состояний автомобилей в рассматриваемом АТП

Результаты обработки статистических данных работы АП представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

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

Анализ показателей надежности АП показывает, что коэффициент выпуска автомобилей на линию достаточно высок ($\alpha_B = \bar{R}_Л = 0,803$) и стабилен ($v = 0,019$). Коэффициент технической готовности, учитывающий

работу автомобилей на линии и их простои по организационным причинам, составил

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

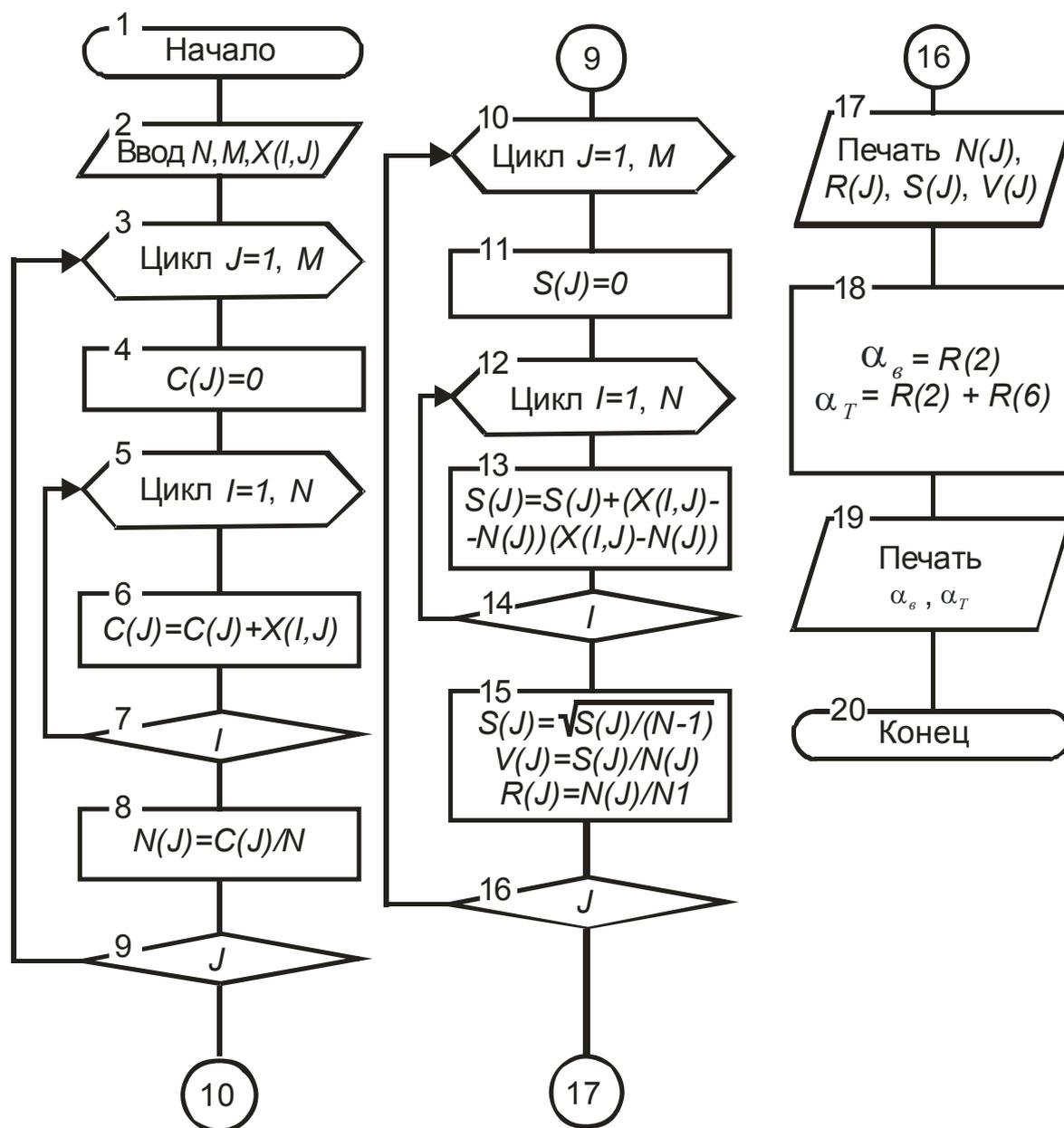


Рис. 1.9. Алгоритм программы расчета показателей надежности автопарка:
 M – число столбцов матрицы; N – число строк; J – номер столбца; I – номер строки;
 $X(I, J)$ – элементы массива; $N(J)$ – среднее статистическое (математическое
 ожидание); $S(J)$ – среднее квадратическое отклонение; $V(J)$ – коэффициент вариации;
 $R(J)$ – относительная величина математического ожидания; $\alpha_с$ – коэффициент
 выпуска автомобилей на линию; α_T – коэффициент технической готовности;
 $C(J)$ – сумма элементов массива данных

Контрольные вопросы

1. Какие проблемы изучает наука о надежности машин?
2. На каких отраслях знаний базируется наука о надежности?
3. В чем заключается экономический аспект науки о надежности?
4. Раскройте понятия качества, надежности, работоспособности, исправного и предельного состояний автомобиля.
5. Приведите классификацию отказов автомобилей.
6. Какими свойствами характеризуется надежность изделий?
7. Какими показателями оценивают безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость машин?
8. Укажите взаимосвязь между вероятностью безотказной работы $P(t)$, вероятностью отказов $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$.
9. Какие показатели используются для комплексной оценки надежности изделий?

Глава 2. ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

В процессе эксплуатации машин, а также в период их хранения в них непрерывно протекают различные физические процессы, которые приводят к изменению параметров отдельных элементов и машины в целом. Основной причиной протекания таких процессов является то, что при работе машин в узлах, агрегатах, элементах возникают различные виды энергии (механической, тепловой, химической, электрической), которые, воздействуя на них, приводят к различным эксплуатационным повреждениям (износам, деформациям, поломкам, коррозии и др.). Это, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных параметров и, в конечном счете, ведет к потере работоспособности (отказу). В упрощенной форме этот процесс представлен на рис. 2.1.

Процессы, приводящие к изменению начальных свойств, протекают в материалах, из которых создано изделие, включая не только детали, но и смазку, топливо, т.е. все, что участвует в рабочем процессе. Следует иметь в виду, что процессы, возникающие в результате действия того или иного вида энергии, часто не сразу приводят к повреждению. Существует так называемый период накопления воздействий, прежде чем начнется период внешнего проявления процесса, т.е. повреждения. Например, для начала

развития усталостной трещины необходимо определенное число циклов переменных напряжений. В отличие от усталости процесс изнашивания начинается сразу же после начала эксплуатации.

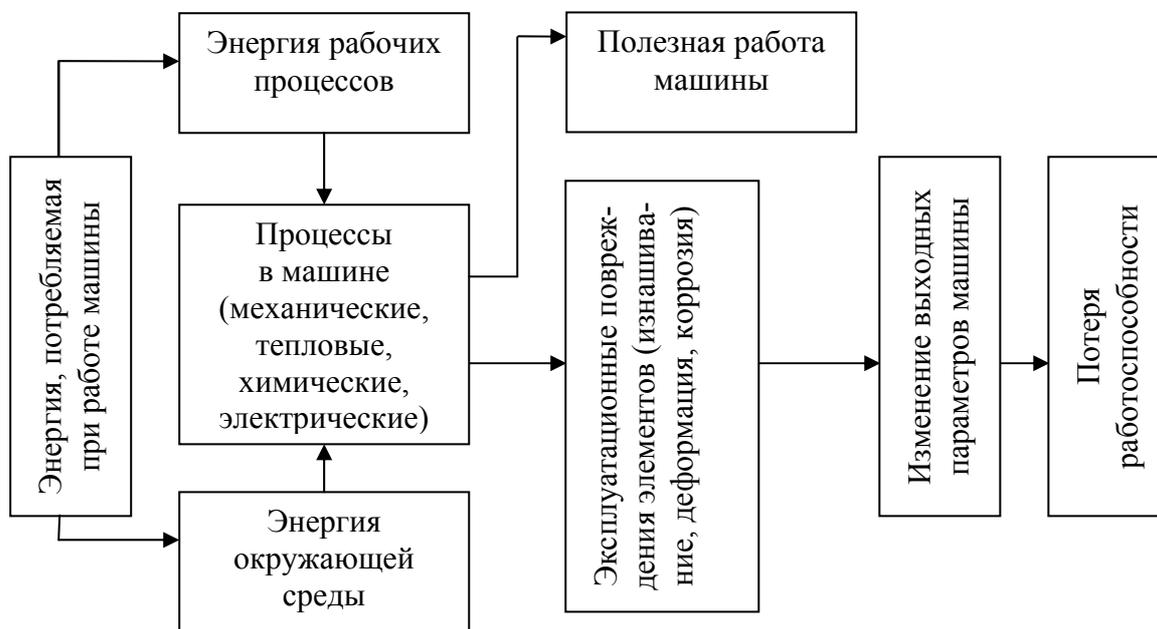


Рис. 2.1. Схема формирования процесса реализации машиной работоспособности

2.1. Основные причины потери машиной работоспособности

К основным причинам возникновения отказов и повреждений относятся усталость металлов, остаточные деформации, старение, коррозия и изнашивание.

Усталостное разрушение происходит в результате возникновения и постепенного развития в металлических деталях машин трещин из-за многократного воздействия переменных нагрузок.

Причиной начала процесса усталостного разрушения являются дефекты кристаллической решетки (пустоты, включения и др.), которые приводят к образованию микро-, а затем и макротрещин. Критериями усталостного разрушения металлов являются предел выносливости (усталости) и долговечность.

Пределом выносливости называют наибольшее напряжение цикла, которое металл образца выдерживает без разрушения при неограниченном числе циклов нагружения. На предел выносливости оказывают влияние механические характеристики материала (пределы текучести и прочности, твердость) и, кроме того, дефекты обработки поверхности детали (образо-

вание концентраторов напряжений на границе участков ожога при шлифовании, неравномерно наклепанный слой и др.).

Долговечность при усталостном нагружении – число циклов нагружения, при котором в данных условиях испытания происходит разрушение. При многократном нагружении в металле вначале накапливаются необратимые изменения, которые приводят к возникновению микроскопических трещин, затем к их увеличению и углублению внутри детали по ее сечению с последующим хрупким разрушением металла (рис. 2.2).

Кривая выносливости показывает зависимость между числом циклов нагружения N и напряжением σ . Напряжение σ_r соответствует пределу усталости детали, т.е. напряжению, ниже которого деталь не получит повреждение за базовое число циклов нагружения N_0 .

Усталостному разрушению подвержены такие узлы, как пружины, рессоры, элементы ходовой части, кузова, рамы, валы, полуоси, зубья шестерен и др. Процесс развития усталостного разрушения делят на три периода: упрочнения, разупрочнения и разрушения. Трещины начинают развиваться во втором, наиболее продолжительном периоде. По некоторым данным интервал между моментом образования видимой усталостной трещины и моментом разрушения металла составляет от 60 до 90 % от общего срока службы детали.

Остаточные деформации – результат пластического деформирования металла, проявляющегося в необратимом изменении формы детали после снятия нагрузки. Такие деформации возникают при больших давлениях на поверхности детали или при воздействии нагрузок, вызывающих напряжения за пределом упругости. В первом случае появляется смятие поверхностей, а во втором – скручивание или изгиб.

Смятию поверхностей подвергаются детали, работающие в условиях значительных нагрузок при отсутствии относительного перемещения контактирующих поверхностей. Такому виду разрушения подвержены шпоночные, шлицевые и резьбовые соединения, упоры, штифты и другие детали автомобиля.

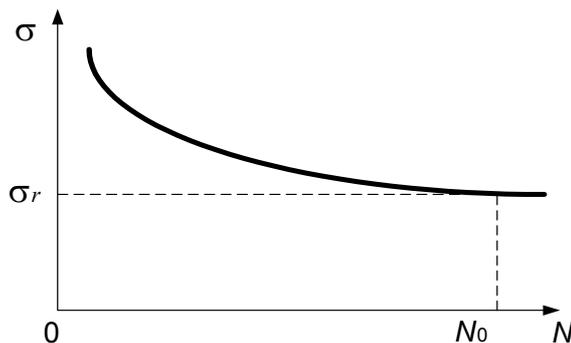


Рис. 2.2. Кривая выносливости детали:
 N – число циклов нагружения;
 σ – напряжение материала детали

Влияние пластических деформаций на интенсивность отказов может быть уменьшено или почти устранено путем повышения твердости элементов пар.

Остаточные напряжения могут возникать также в результате релаксации* внутренних напряжений в деталях (блоки и головки цилиндров, другие корпусные детали), которые вызывают их коробление.

Старение изделий – это процесс изменения строения и свойств материала, происходящий либо самопроизвольно при длительной выдержке и обычной температуре, либо в результате нагрева при искусственном старении. В случае самопроизвольного процесса перехода материала из нестабильного состояния в стабильное происходит перемещение атомов в металле, изменяется его кристаллическая структура. Процесс старения неоднозначный и включает в себя целую гамму параллельных процессов.

С целью улучшения или стабилизации характеристик металлических деталей машин на практике нередко применяют искусственное старение. Однако при этом наряду с улучшением одних характеристик материала детали может произойти ухудшение других. Так, например, упрочнение при старении сопровождается одновременно снижением пластичности металла.

Механизм указанных превращений очень сложен, и на характер их протекания наиболее существенное влияние оказывает температура материала. Эти превращения могут происходить в широком диапазоне температур, включая температуры, характерные для обычных условий эксплуатации изделия.

В результате старения происходит изменение механических и физических свойств металла: на первых стадиях наблюдаются упрочнение, увеличение твердости и повышение сопротивляемости пластической деформации; на последних стадиях прочность металла снижается.

Старение изделий из неметаллических материалов заключается в изменении во времени их физико-механических свойств под влиянием окружающей среды и условий эксплуатации: кислорода воздуха, перепадов температур, влажности, воздействия солнечных лучей. При этом происходит снижение прочности, эластичности, увеличение хрупкости при низких температурах, появление трещин и др.

* Релаксация – процесс постепенного перехода термодинамической системы из неустановившегося состояния, вызванного внешними воздействиями, в состояние термодинамического равновесия.

Коррозионное разрушение – следствие химического или электрохимического взаимодействия металлов с коррозионной средой. В результате часть металла переходит в ионное состояние с образованием окислов, солей.

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).

Частными случаями химической коррозии являются *газовая* и *коррозия в неэлектриках*. Газовая коррозия происходит в активных газовых средах при повышенной температуре. В таких условиях работают, например, цилиндры, поршни, клапаны, выхлопные трубы двигателей внутреннего сгорания. Агрессивными свойствами при этом обладает не только кислород, но и пары воды, углекислота, сернистый газ, хлор, сероводород.

При газовой коррозии клапанов и выхлопной трубы происходит процесс образования окалина, который усиливается по мере роста температуры нагрева. При циклических изменениях температуры в окалине возникают внутренние напряжения, которые обусловлены большой разницей коэффициентов линейного расширения (у окалина он намного меньше, чем у металла). В результате окалина разрушается.

Коррозия в неэлектриках происходит при воздействии на металл агрессивных органических веществ: жидких топлив, растворителей, смазочных масел. Коррозионная активность последних зависит от содержания серы, агрессивных продуктов окисления смазочного масла, хлора, йода и других активных элементов противозадирных присадок. При попадании в масло воды процесс коррозии становится электрохимическим.

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).

Интенсивность коррозии зависит главным образом от скорости диффузии окислительных компонентов к поверхности металла, химических и

электрохимических реакций. Скорость этих реакций обуславливается энергией активации взаимодействия металла с коррозионной средой, реакцией потенциалов на их границе

$$I = \frac{U_c - U_m}{R}, \quad (2.1)$$

где I – сила электрического тока; U_c , U_m – электродные потенциалы среды и поверхности металла; R – омическое сопротивление.

Разность потенциалов на границе, например, капли атмосферной влаги и поверхности металла, достигает 6 В. Из всех видов коррозии только при газовой не возникает электрический ток, так как в этой среде отсутствует разница потенциалов, т.е.

$$U_c - U_m = 0.$$

Электрохимическая коррозия подразделяется на атмосферную, в электролитах, контактную и др. Потери металла от атмосферной коррозии составляют более половины общих потерь металла из-за коррозии. Одной из причин ее возникновения является увлажнение металла. В зависимости от толщины пленки влаги на поверхности металла атмосферную коррозию можно условно подразделить на сухую, влажную и мокрую (рис. 2.3).

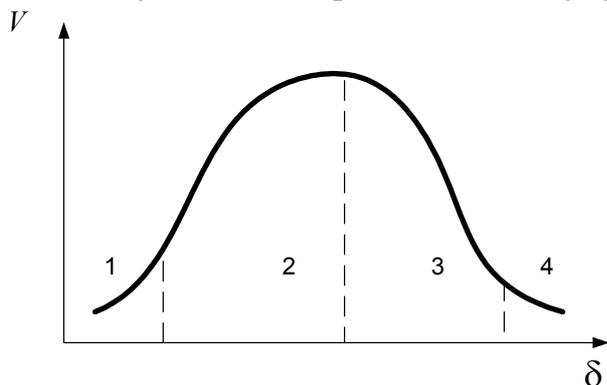


Рис. 2.3. Зависимость скорости атмосферной коррозии V от толщины пленки влаги δ на поверхности металла: 1 – поверхность сухая; 2 – влажная; 3 – мокрая; 4 – в электролите

При сухой коррозии на металле образуются тончайшие окисные пленки по принципу химической коррозии. Интенсивность процесса здесь минимальная.

Атмосферную коррозию, протекающую при относительной влажности менее 98 % под конденсационными пленками влаги (до 1 мкм), называют влажной. При этой толщине пленки наблюдается значитель-

ное повышение скорости коррозии вплоть до максимума.

Атмосферную коррозию, протекающую при относительной влажности выше 98 % в условиях капельной конденсации или прямого попадания атмосферных осадков на поверхность металла, называют мокрой. По своему механизму процесс подобен электрохимической коррозии. Скорость мокрой коррозии ниже, чем влажной, так как слой жидкости затрудняет

диффузию кислорода. При полном погружении в электролит скорость коррозии еще меньше.

Контактная коррозия возникает при контакте разнородных металлов, имеющих различные электрохимические потенциалы, в электропроводящих средах. Кроме того, такая коррозия проявляется при контакте однородных металлов, соединенных между собой болтами, заклепками, сваркой или пайкой.

Щелевая коррозия протекает в узких зазорах контактирующих поверхностей металлов. Кроме того, она возникает при контакте металла с неметаллом. Такому виду разрушения подвержены клапанные устройства, калиброванные дозирующие устройства, гильзы цилиндров под резиновыми уплотнительными манжетами и др.

Коррозия под напряжением протекает при одновременном воздействии коррозионной среды и механических напряжений, приводящих к деформации металла. В процессе деформирования металла снижается его термодинамическая стабильность, нарушается защитная пленка на поверхности, что способствует активизации процесса коррозии. Такому виду коррозии подвержены оси автомобилей, рессоры, клапаны двигателей внутреннего сгорания.

Характер и скорость протекания коррозионных процессов зависят от множества факторов, которые характеризуют состояние металла, его химический состав, технологические особенности изготовления полуфабрикатов (литье, обработка давлением и др.), технологические процессы обработки поверхностей деталей (механические, химико-термические и др.). Большую группу факторов составляют эксплуатационные факторы: продолжительность эксплуатации, температура и диапазон ее изменения, характер загрязнения поверхностей, внешние нагрузки, контакт с агрессивной средой и т.д.

2.2. Физическая сущность и закономерности изнашивания

Основной причиной потери автомобилем работоспособности является изнашивание деталей и пар трения. Поэтому изучение закономерностей изнашивания, выявление факторов, влияющих на интенсивность этого процесса, позволяет управлять им, тормозить изменение технического состояния деталей путем создания наиболее выгодных режимов их работы в заданных условиях.

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. Изнашивание является довольно сложным процессом, до настоящего времени недостаточно изученным.

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. Эти связи и их разрыв приводят, в конечном счете, к разрушению микрообъемов поверхности и их удалению, т.е. изнашиванию.

Современное представление о природе изнашивания базируется на хорошо изученном факте дискретности контакта шероховатых тел, в соответствии с которым фактическая площадь контакта металлических поверхностей при умеренных давлениях составляет не более 0,1 – 1,0 % номинальной площади. Дискретный характер касания, наличие большого числа пятен контакта и соответственно фрикционных связей является следствием того, что реальные поверхности деталей имеют сложный рельеф, который характеризуется шероховатостью и волнистостью.

В процессе изнашивания исходный (технологический) рельеф преобразуется в эксплуатационный (рис. 2.4). При этом устанавливается та шероховатость поверхности, которая соответствует данному процессу разрушения поверхностных слоев в период

нормального изнашивания.

Изнашивание включает ряд физико-химических процессов:

- снятие тончайших слоев металла (микрорезание);
- смятие отдельных микронеровностей (пластическая и упруго-пластическая деформация);
- усталостное выкрашивание микронеровностей в результате многократного упругого их деформирования;
- изменение структуры металла, повышение его хрупкости при нагрузках, вызывающих высокие локальные температуры;

- молекулярное взаимодействие поверхностей, заключающееся в сращивании отдельных участков контакта микронеровностей и в переносе частичек металла с одной поверхности на другую, и др.

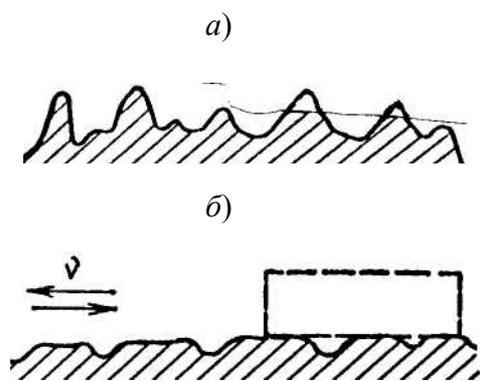


Рис. 2.4. Схема преобразования технологического рельефа поверхности (а) в эксплуатационный (б)

В настоящее время наиболее приемлемой для практического использования принята следующая классификация видов изнашивания:

- механическое;
- молекулярно-механическое;
- коррозионно-механическое.

Механическое изнашивание происходит только в результате механических взаимодействий материалов изделий. К нему относят абразивное, усталостное, вследствие пластического деформирования, кавитационное, эрозионное.

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 автомобиля.

Разновидностью абразивного износа являются гидроабразивное и газоабразивное изнашивание. Такое изнашивание возникает в результате действия твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе и перемещающихся относительно изнашивающегося тела. Гидроабразивному виду изнашивания подвержены плунжеры пары, гильзы цилиндров дизельных двигателей, трубопроводы. Газоабразивному виду изнашивания подвержены клапаны, поршневые кольца, зеркала цилиндров двигателей в результате контакта с потоком раскаленных газов.

Усталостное изнашивание (контактная усталость) проявляется в виде местного выкрашивания на поверхностях сопряженных деталей, перекатывающихся под нагрузкой с проскальзыванием или без него. Этот вид изнашивания является характерным для элементов подшипников качения, зубчатых колес, кулачков и толкателей, вкладышей подшипников коленчатого вала и других деталей. В технической литературе усталостное разрушение материала часто называют «питтингом».

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. Такому из-

носу подвержены резьбовые, шпоночные и шлицевые соединения, втулки шатунов, вкладыши подшипников и др.

Кавитационное изнашивание (кавитационная эрозия) возникает при движении жидкости относительно поверхности детали, когда вблизи поверхности образуются, а затем захлопываются пузырьки газа. В результате разрушения этих пузырьков возникают локальные гидравлические удары большой силы с образованием каверн (полостей). Такой износ наблюдается на наружных поверхностях мокрых гильз цилиндров двигателя, полосках водяных насосов и других деталях.

Эрозионным изнашиванием называют процесс изменения размеров детали при динамическом воздействии на материал механических частиц или электрических разрядов. Механические частицы могут быть твердыми, жидкими или газообразными. В зависимости от этого различают абразивную, кавитационную, газовую и электрическую виды эрозии.

Молекулярно-механическое изнашивание (изнашивание при схватывании) проявляется как следствие молекулярного взаимодействия поверхностей. Характерными признаками его проявления являются схватывания, задиры, перенос частичек металла с одной из сопряженных поверхностей на другую. Этот вид изнашивания нередко встречается в сопряженных деталях автомобильных двигателей (задиры стенок цилиндров, стержней и направляющих втулок клапанов, тарелок толкателей, кулачков распределительного вала и др.).

Коррозионно-механическое изнашивание возникает в результате сочетания коррозии и механического изнашивания. Подразделяется на окислительное и фреттинг-коррозию.

При окислительном изнашивании кислород воздуха (или растворенный в масле) образует на поверхности металла окисную пленку, которая механически удаляется при трении. Затем процесс повторяется, и в него вступают новые, нижние слои металла. Изнашивание ускоряется, так как окисные пленки, как правило, малостойки при трении.

Изнашивание при фреттинг-коррозии происходит вследствие вибраций контактирующих поверхностей или периодических деформаций деталей. На участках, поврежденных фреттинг-коррозией, образуются окисные пленки, которые при разрушении играют роль абразивных частиц при относительных перемещениях деталей и не удаляются за пределы области трения.

Каждый из перечисленных видов изнашивания редко встречается в чистом виде – обычно они проявляются комплексно. Например, рабочие поверхности гильз цилиндров подвергаются как абразивному, так и молекулярно-механическому и коррозионно-механическому видам изнашивания. Любой из них может оказаться ведущим или сопутствующим в зависимости от условий и режимов работы двигателя.

Изнашивание машин является стадийным процессом, который может быть подразделен на три периода (рис. 2.5).

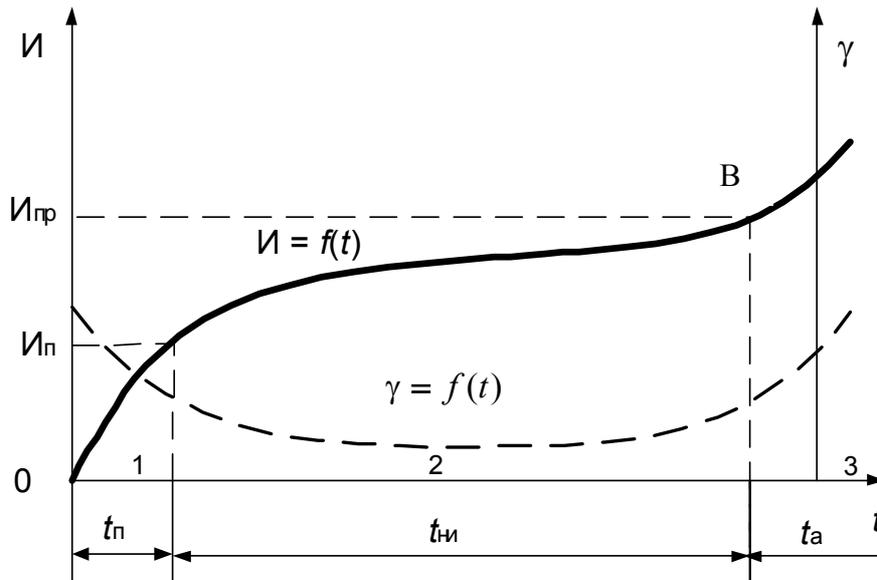


Рис. 2.5. Кривая изнашивания деталей машин:
 t_{II} – период приработки; t_{HI} – период нормального изнашивания;
 t_a – аварийное изнашивание; I_{II} – износ за период приработки;
 I_{IP} – предельный износ; $I = f(t)$ – кривая износа;
 $\gamma = f(t)$ – скорость изнашивания

В первый период (t_{II}) осуществляется микро- и макрогеометрическая приработка поверхности трения деталей и в некоторой степени стабилизируются показатели их технического состояния. Происходит разрушение микронеровностей поверхностей трения деталей. В этот период скорость изнашивания монотонно убывает до значения $\gamma = \text{const}$, характерного для периода t_{HI} установившегося (нормального) изнашивания. 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.

Третий период характеризует наступление аварийного изнашивания, 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 период становится нерентабельной из-за резкого роста затрат на поддержание их в технически исправном состоянии и даже опасной из-за недостаточной прочности деталей.

Линейная зависимость между износом и наработкой для установившегося режима, типичного для нормальных условий эксплуатации, имеет вид

$$И = \gamma t, \quad (2.2)$$

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

С учетом приработки эта зависимость выглядит следующим образом:

$$И = И_{п} + \gamma t, \quad (2.3)$$

где $И_{п}$ – износ за период приработки.

2.3. Основные факторы, определяющие интенсивность изнашивания

При изучении процесса изнашивания учитывают внешние механические воздействия, факторы внешней среды и свойства материалов трущихся поверхностей. Одним из наиболее часто встречающихся видов изнашивания является изнашивание поверхностей вследствие трения.

2.3.1. Влияние на изнашивание вида трения

Трение в технике имеет как положительное, так и отрицательное значение. Положительную роль оно играет в таких элементах конструкций, как заклепочные и резьбовые соединения, тормозные механизмы, ременные и фрикционные передачи, принцип действия которых основан на использовании трения. Отрицательное влияние трения проявляется в двух формах: во-первых, как вредное сопротивление движению, приводящее к бесполезному рассеиванию энергии и нагреву узлов трения; во-вторых, как изнашивание деталей.

В соответствии с Государственным стандартом различают следующие виды трения:

- по наличию относительного движения (трение движения, трение покоя);
- характеру относительного движения (трение скольжения, трение качения);
- наличию смазочного материала (трение без смазки, трение со смазкой).

Трение представляет собой сложный физико-химический процесс, зависящий от давления на поверхности детали, свойств материала, из которого изготовлены сопряженные элементы, наличия и вида смазки, состояния поверхностей трущихся тел и т.п.

Так, в зависимости от состояния поверхностей трущихся элементов и наличия смазки различают следующие виды трения скольжения (рис. 2.6):

- сухое, когда между поверхностями смазка отсутствует;
- граничное, возникающее в том случае, если поверхности отделены друг от друга чрезвычайно тонким слоем смазки (менее 0,1 мкм), не обладающим свойствами жидкости;
- жидкостное, когда поверхности полностью разделены слоем жидкой смазки.

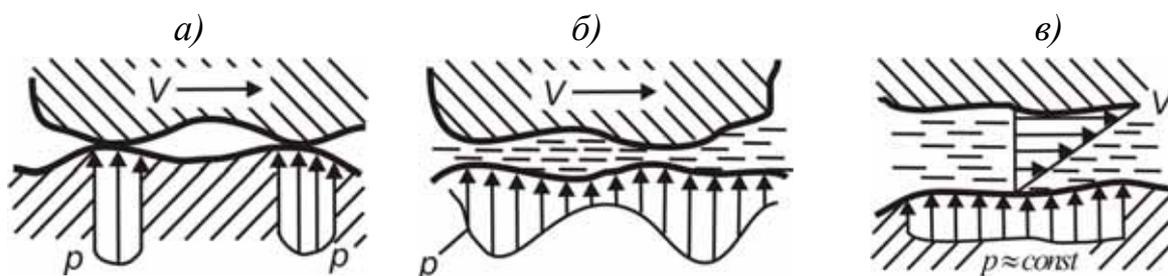


Рис. 2.6. Виды трения: а – сухое; б – граничное; в – жидкостное

Сухое трение вызывает наибольшую скорость изнашивания, так как здесь создаются условия для возникновения молекулярного взаимодействия и таких явлений, как повышение температуры, концентрация давления P на отдельных участках, что интенсифицирует процесс разрушения поверхностных слоев.

Жидкое трение – наиболее желательный вид трения с точки зрения предотвращения износа. Слой смазки устраняет непосредственный контакт двух поверхностей, благодаря чему не только значительно уменьшаются силы трения, но и создаются условия для резкого уменьшения износа поверхностей.

При жидкостном трении каждый участок поверхности нагружен постоянным давлением, не изменяющимся при относительном перемещении сопряженных деталей ($P = \text{const}$). Эта нагрузка не в состоянии разрушить микровыступы, так как возникающие напряжения находятся в области больших запасов прочности.

Однако жидкостное трение обладает рядом недостатков: во-первых, оно связано с существенным усложнением конструкции системы смазки, во-вторых, наличие масляного слоя между поверхностями может нарушить точность перемещения узла.

Жидкостное трение наблюдается в подшипниках коленчатого вала двигателя в период установившегося режима работы.

Наиболее характерным для большинства узлов и механизмов машин является граничное трение, когда трущиеся детали разграничены лишь теми слоями молекул, которые адсорбированы на поверхностях трения. В этом случае на трение и износ оказывают влияние как характеристики сопряженных материалов, так и свойства смазочного слоя.

Износ может происходить при локальных разрывах масляной пленки и при передаче усилий через эту пленку. Наличие граничного смазочного слоя приводит к таким явлениям, как более равномерное распределение контактных напряжений, их деконцентрация, уменьшение температурных влияний и др.

Примером граничного трения может служить трение в зацеплении шестерен главной передачи заднего моста автомобиля, шариковых подшипниках, т.е. в условиях высоких удельных нагрузок. В целом граничное трение существенно уменьшает по сравнению с сухим скорость изнашивания. Коэффициент трения снижается в 5 – 10 раз по сравнению с трением сопряженных деталей при отсутствии какого-либо смазочного материала.

На практике при работе механизмов и узлов автомобиля наблюдаются смешанные или промежуточные виды трения (полусухое, полужидкостное и др.).

2.3.2. Зависимость интенсивности изнашивания от 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 ма-

териалов в условиях граничного и близких к нему видов трения показывает, что в общем случае скорость изнашивания выражается зависимостью

$$\gamma = kP^m v^n, \quad (2.4)$$

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

В частности, для абразивного и ряда других видов изнашивания $m = n = 1$, т.е. зависимость (2.4) в данном случае носит линейный характер.

Для практических целей значения P и v должны выбираться из условия, что изнашивание возможно (допускается) только в условиях стационарного участка (участки 2 на рис. 2.7, а и 1 на рис. 2.7, б), когда интенсивность изнашивания примерно постоянна (устойчива) и минимальна по сравнению с ее величиной на других участках. При нормальной эксплуатации узлы трения работают исключительно в стационарной области (области нормального изнашивания). В то же время вероятность нарушения нормальных условий на практике достаточно велика.

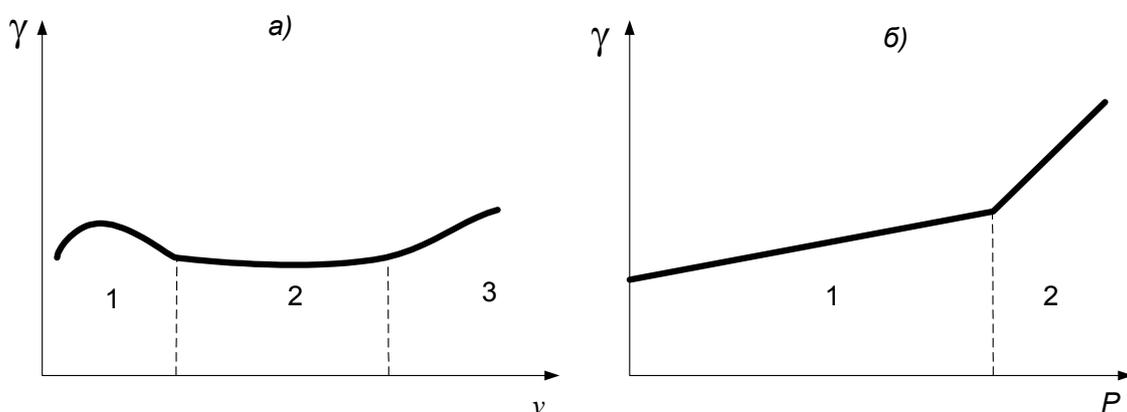


Рис. 2.7. Зависимости скорости изнашивания γ от скорости относительного перемещения v и давления P на поверхности трения

Основным признаком нормального изнашивания является то, что разрушение поверхности локализуется в тончайших поверхностных слоях вторичных структур, образующихся при трении в условиях динамического равновесия механического процесса образования и разрушения этих структур.

2.3.3. Влияние механических характеристик материалов на изнашивание

Изнашивание, так же как и трение, является комплексным процессом. При относительном перемещении двух поверхностей в области их контакта возникают механические и молекулярные связи, сопровождающиеся тепловыми, окислительными и другими эффектами. Эти связи и их разрыв приводят в конечном счете к разрушению микрообъемов поверхности и их удалению, т.е. к изнашиванию. Поэтому все прочностные характеристики материалов играют определенную роль в каждом элементарном акте разрушения.

В наибольшей степени из всех механических характеристик на износостойкость (способность материала сопротивляться разрушению поверхности детали при трении) металлов и сплавов оказывает влияние их твердость. Для чистых металлов и термически необработанных сталей зависимость между твердостью и относительной износостойкостью определяется выражением

$$\varepsilon = bH, \quad (2.5)$$

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b'(H - H_0), \quad (2.6)$$

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

2.3.4. Влияние на изнашивание качества поверхности детали

Разрушение деталей и прежде всего изнашивание в большинстве случаев начинаются 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 геометрическими и физическими параметрами ее поверхностного слоя. К важнейшим геометрическим параметрам качества поверхности относятся: макрогеометрия, шероховатость, волнистость и направление следов обработки.

Макрогеометрия характеризует различные отклонения формы реальной поверхности детали от номинальной, т.е. формы, заданной чертежом. К ним прежде всего следует отнести отклонения от круглости (овальность и граненость) и отклонения от профиля продольного сечения (конусообразность, бочкообразность, седлообразность и изогнутость).

От макрогеометрии зависит правильность относительного расположения и перемещения сопряженных поверхностей деталей, а также прочность неподвижных посадок. Значение макрогеометрии особенно существенно для таких деталей автомобиля, как цилиндры двигателя, шейки коленчатых валов, тонкостенные вкладыши, прецизионные элементы топливных насосов высокого давления и др.

Шероховатость поверхности в основном зависит от точности обработки детали на ее заключительных стадиях. Особенно сильно влияние шероховатости на интенсивность изнашивания проявляется в сопряжениях с зазором на стадии приработки. Шероховатость изменяется в процессе работы сопряжения как по размерам, так и по форме (рис. 2.8).

По окончании приработки, как видно из приведенных зависимостей, наступает период нормальной работы сопряжения, характеризующийся постоянством скорости изнашивания деталей цилиндрико-поршневой группы (износ колец по характеру протекания процесса тот же).

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. При этом влияние исходной шероховатости поверхности на интенсивность износа ограничивается стадией приработки.

В плотных и неподвижных соединениях шероховатость также оказывает большое влияние на точность и прочность сопряжений. Чем больше шероховатость, тем меньше прочность сопряжений.

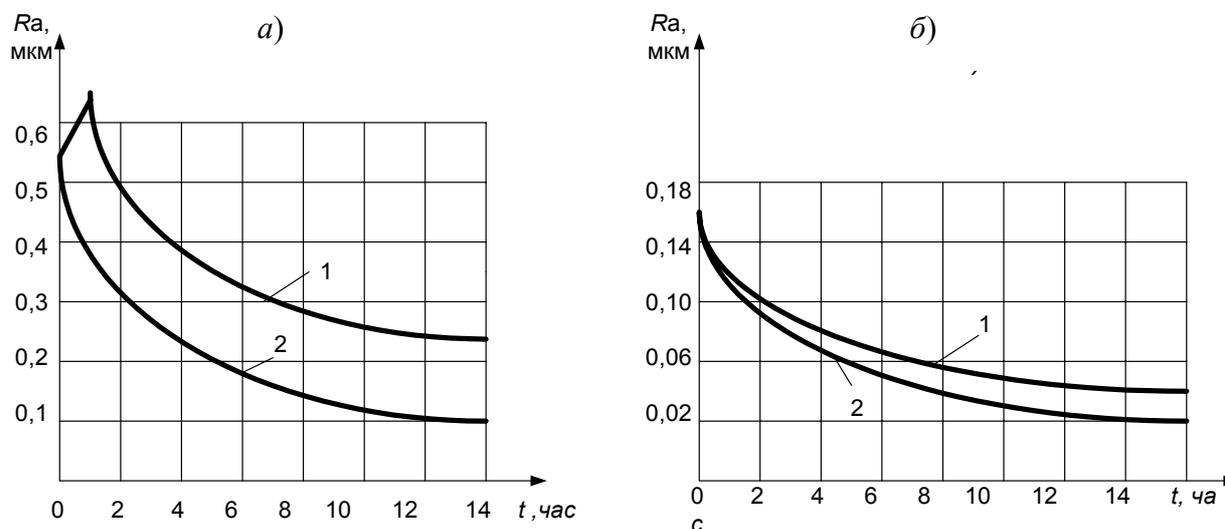


Рис. 2.8. Изменение шероховатости деталей цилиндро-поршневой группы в процессе обкатки двигателя: а – поршень; б – гильза цилиндров; R_a – параметр шероховатости; t – время обкатки

Шероховатость 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.

Волнистость и направление следов механической обработки, хотя и оказывают влияние на износостойкость деталей, однако значимость этих факторов существенно ниже, чем шероховатость.

2.3.5. Влияние на изнашивание условий эксплуатации

В общем случае на интенсивность изнашивания деталей автомобилей оказывают влияние большое число факторов их реальной эксплуатации: состояние дорог, условия хранения, природно-климатические условия, состояние производственно-технической базы для ТО и ремонта, квалификация водителей и ремонтно-обслуживающего персонала, соблюдение графика выполнения ТО, принятые методы обслуживания и ремонта и др.

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 абразивного 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.

Для устранения усталостного изнашивания необходимо, чтобы нагрузки при трении качения, действующие на контактирующие поверхности (подшипников качения, зубчатых передач, кулачковых механизмов и др.), не превышали предела текучести.

Более подробно влияние на изнашивание других факторов реальной эксплуатации будет рассмотрено в гл. 5.

2.4. Предельные и допустимые износы

Предельное состояние характеризует выход изделия из области работоспособности. Это может относиться как к машине в целом, так и к ее агрегатам, узлам и деталям.

Определение предельного состояния, т.е. установление их нормативных значений, является сложной задачей, так как при конструировании, как правило, назначаются допустимые пределы изменения выходных параметров только для машины в целом или для ее отдельных агрегатов. Однако объективная оценка надежности сложного изделия требует установления предельных нормативов для всех элементов и деталей, от которых зависит работоспособность этого изделия.

Предельное состояние машины или агрегата назначается в основном исходя из допустимых отклонений выходного параметра на основании данных эксплуатации и ремонта.

Известно, например, что в эксплуатации автомобиль подвергается непрерывному процессу изменений и отклонений от начальных параметров. Изменение размеров и геометрии деталей ведет к нарушению нор-

мальных сопряжений, т.е. к увеличению зазоров, которые в свою очередь способствуют еще более ускоренному процессу изнашивания. Все это приводит к тому, что выходные параметры автомобиля ухудшаются.

Отклонение их от допустимых значений и может служить в качестве оценки для определения предельного состояния. Износ, например, таких деталей, как гильз цилиндров, поршней, поршневых колец, коленчатых валов и других трущихся деталей двигателей неизбежно приводит к снижению эффективной мощности, повышению удельного расхода топлива.

Анализ износа деталей двигателя в реальных условиях эксплуатации показывает, что между величиной износа, мощностью и расходом топлива существует определенная зависимость (рис. 2.9). До какого-то износа эффективная мощность возрастает, а удельный расход топлива снижается. С дальнейшим увеличением износа эффективная мощность плавно снижается, а удельный расход топлива, наоборот, повышается.

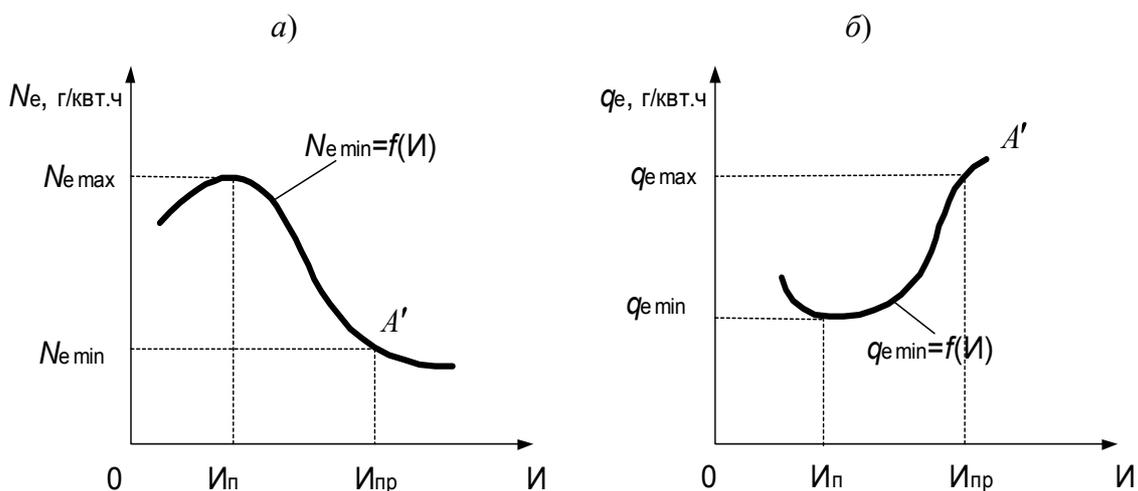


Рис. 2.9. Графики изменения эффективной мощности N_e (а) и удельного расхода топлива q_e (б) от степени износа двигателя

В первом периоде работы двигателя (участок $0 - I_{п}$) – периоде приработки деталей – коэффициент трения большой и потери мощности на работу сил трения максимальные. По мере приработки деталей потери мощности на преодоление внешнего трения снижаются, эффективная мощность при всех прочих равных условиях работы двигателя повышается.

После завершения процесса приработки дальнейшая работа двигателя приводит к увеличению зазора между цилиндрами и сопряженными с

ними деталями с неизбежной потерей компрессии. С этого момента дальнейшее изнашивание деталей сопровождается снижением эффективной мощности двигателя и повышением удельного расхода топлива. 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_{emin} и q_{emax} . Дальнейшая работа автомобиля с таким двигателем становится нерентабельной.

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

При оценке работоспособности агрегата, механизма, узла необходимо установить предельные и допустимые значения износов их деталей и сопряжений. Нормативы на предельные износы в настоящее время имеются, как правило, для весьма ограниченной номенклатуры деталей. При этом часто они недостаточно обоснованы, поэтому на практике при каждом ремонте машин приходится решать – пригодна деталь для дальнейшей эксплуатации либо ее надо менять, или восстанавливать.

Из анализа кривой, выражающей в общем виде процесс изнашивания детали (см. рис. 2.5), ее предельный износ определяется критической точкой В.

Установление этой точки имеет очень важное практическое значение. Если деталь или группа деталей, принадлежащих одному агрегату, в результате изнашивания достигнет критической точки В и агрегат не будет отправлен в ремонт, то прогрессирующая скорость изнашивания неизбежно приведет к поломке как данной детали, так и других сопряженных с ней деталей. Это повлечет за собой отказ агрегата в целом со всеми возможными последствиями (увеличением объема ремонтных работ; вероятностью возникновения ДТП, если он относится к узлам, влияющим на безопасность движения).

Если же агрегат отправить в ремонт значительно раньше момента наступления предельного состояния, то это приведет к недоиспользованию его ресурса.

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 дета-

лей и агрегатов автомобиля предельные состояния устанавливаются по износу, деформациям, величине возникающих трещин, изменениям геометрической формы и т.д.

Техническое состояние двигателя, например, определяется износом и изменением геометрической формы деталей двух основных групп сопряжений: кривошипно-шатунной и цилиндрико-поршневой. Поэтому прежде всего необходимо установить критерии предельного состояния деталей именно этих сопряжений (вкладышей подшипников, шеек коленчатого вала, гильз цилиндров, поршней, поршневых колец).

За критерий предельного состояния вкладыша целесообразно принимать начало разрушения антифрикционного слоя. В связи с этим при замене поршневых колец или каких-либо других причинах вынужденного вскрытия подшипников обнаружится, что антифрикционный слой начинает выкрашиваться, вкладыш необходимо заменить.

За параметр предельного состояния шеек коленчатого вала принимают износ и не учитывают изменение их геометрической формы. Однако, как показывают исследования [1], изменение геометрической формы шеек (в основном некруглости) резко снижает долговечность сопряжения. Так, например, увеличение некруглости шейки в 2 раза (по сравнению с номинальной) снижает наработку вкладыша до начала разрушения в 8 раз. Поэтому наряду с нормативами износов шеек коленчатого вала следует учитывать и отклонения от геометрической формы.

Критерием предельного состояния гильзы цилиндров может быть, главным образом, изменение их геометрической формы, так как радиальный износ в сопряжении кольцо – гильза неравномерный. При этом увеличивается зазор между поршневым кольцом и гильзой, что приводит к увеличению утечки газов в картер и снижению экономичности двигателя.

Таким образом, предельную величину износа детали устанавливают с учетом характера процесса ее изнашивания.

При ремонте автомобилей наряду с предельными весьма важное значение имеет установление допустимых износов деталей и узлов.

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 (рис. 2.10).

Нарботка детали до предельного состояния $t_{пр}$ определяется по формуле

$$t_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{пр}}}{\gamma}, \quad (2.8)$$

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

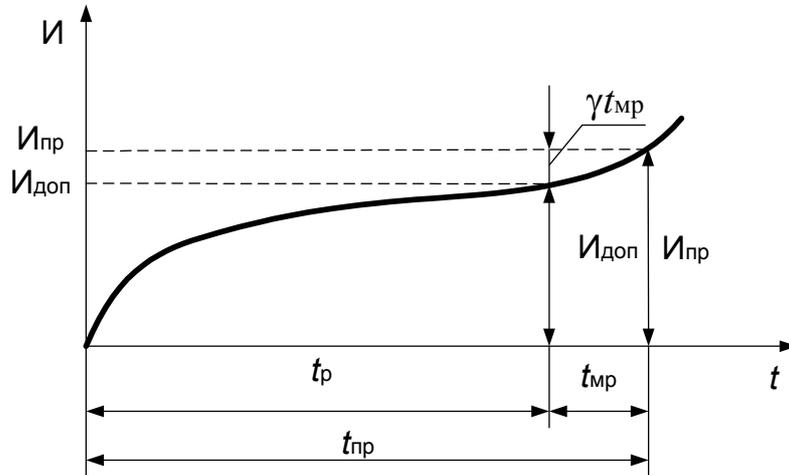


Рис. 2.10. Схема определения допустимого износа

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

$$I_{\text{мр}} = \gamma t_{\text{мр}}. \quad (2.9)$$

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

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{пр}} - \gamma t_{\text{мр}}. \quad (2.10)$$

Учитывая, что скорость изнашивания может быть выражена соотношением $\gamma = I_{\text{доп}}/t_{\text{р}}$, где $t_{\text{р}}$ – наработка детали до выполняемого в данный момент ремонта, получим:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{пр}} - \frac{I_{\text{доп}} t_{\text{мр}}}{t_{\text{р}}} = \frac{I_{\text{пр}}}{1 + t_{\text{мр}}/t_{\text{р}}}. \quad (2.11)$$

Если с начала эксплуатации данный ремонт будет k -й, то $t_{\text{р}} = kt_{\text{мр}}$. Тогда допустимый износ будет равен

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пр}}}{1 + t_{\text{мр}}/kt_{\text{мр}}} = \frac{k}{k+1} I_{\text{пр}}. \quad (2.12)$$

Следует отметить, что эта формула будет верна при условии, что скорость изнашивания $\gamma = \text{const}$, т.е. при нормальном изнашивании.

Пример. Деталь поступила в ремонт с текущим значением износа

$I_{\phi} = 0,09$ мм. Необходимо ли осуществлять ее восстановление, если предельный износ $I_{пр} = 0,12$ мм и этот ремонт 2-й с начала эксплуатации, т.е. $k = 2$.

По формуле (2.12) определяем допустимый износ

$$I_{\text{доп}} = \frac{2}{2+1} 0,12 = 0,08 \text{ мм.}$$

Следовательно, деталь необходимо восстанавливать, так как ее фактический износ превышает допустимый.

Определение допустимых зазоров сопряжений может быть представлено схемой (рис. 2.11).

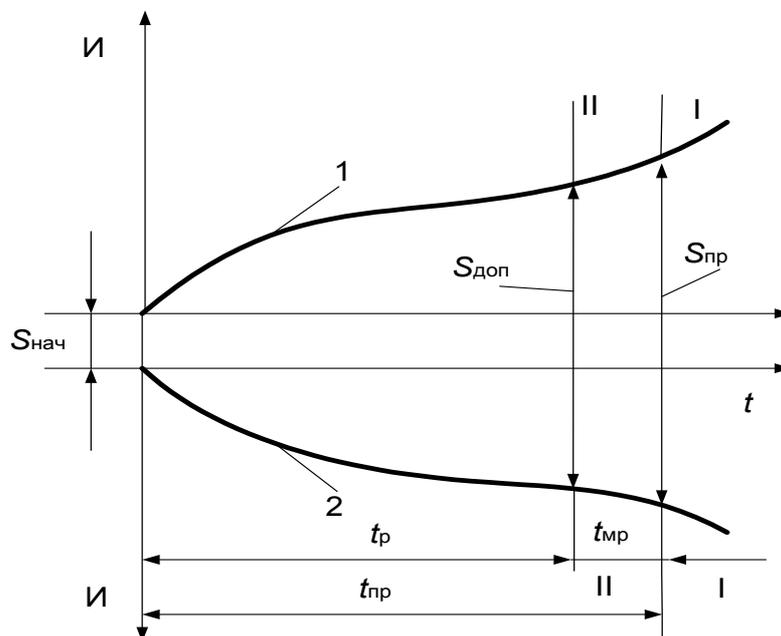


Рис. 2.11. Схема определения допустимого зазора в сопряжении: $S_{\text{нач}}$ – начальный зазор в сопряжении; $t_{\text{пр}}$ – наработка до предельного состояния сопряжения; t_p – наработка с начала эксплуатации до данного ремонта

Если известны экспериментальные кривые износа двух сопряженных деталей и величина предельного зазора, то допустимое значение зазора, при котором сопряжение не потеряет работоспособность в течение очередного межремонтного периода, находится следующим образом.

Влево от вертикали I – I, определяющей предельное состояние сопряжения, откладывается значение межремонтной наработки $t_{\text{мр}}$ и проводится вертикаль II – II. Величина $S_{\text{доп}}$, соответствующая размеру между кривыми изнашивания 1-й и 2-й деталей, и будет соответствовать значению допустимого зазора в сопряжении.

Если фактическое значение зазора $S_{\text{ф}} \leq S_{\text{доп}}$, то такое сопряжение восстанавливать нецелесообразно, так как оно проработает в течение $t_{\text{мр}}$ без потери работоспособности. Если $S_{\text{ф}} > S_{\text{доп}}$, сопряжение необходимо ремонтировать.

Пересечение вертикали II – II с линиями износа деталей 1 и 2 и линиями начального зазора сопряжения $S_{\text{нач}}$ соответствуют допустимым износам этих деталей. Если одна из деталей сопряжения имеет больший предельный и соответственно допустимый износ, то восстановление работоспособности такого сопряжения возможно за счет ремонта или замены только одной детали.

Оценка предельных и допустимых состояний изделий является весьма важным и необходимым этапом построения моделей их отказов.

2.5. Методы определения износов

Несмотря на достигнутые успехи в области разработки расчетных способов определения износов и долговечности изделий, основными методами их количественной оценки остаются эмпирические методы, основанные на измерении степени их повреждения. Объективность и достоверность таких оценок зависит главным образом от характера контакта трущихся поверхностей и их относительных перемещений.

Если, например, при контакте поверхностей нет относительного перемещения, то это вызывает, как правило, их *смятие* (пластическую деформацию). Смятие поверхностей является характерным видом разрушения шпоночных, шлицевых и резьбовых соединений, упоров и штифтов.

Относительное скольжение поверхностей вызывает их *износ*. При этом влияние пластических деформаций, сопровождающих изнашивание, может быть уменьшено или полностью устранено путем повышения твердости элементов пар трения.

При малых относительных колебательных перемещениях сопряженных деталей возникает специфический вид изнашивания – *фреттинг-коррозия*.

Качение без скольжения, т.е. обкатка двух тел вызывает усталость поверхностных слоев, которая проявляется в виде отслаивания мелких частиц металла с поверхности контакта. Это относится, например, к подшипникам качения, роликам кулачковых механизмов и другим деталям автомобиля. При недостаточной твердости материалов и больших удельных давлениях усталостное изнашивание может сопровождаться пластической деформацией.

При качении с относительным скольжением, например в зубчатых передачах, наблюдаются и *износ*, и *усталость*, а в ряде случаев и *смятие* поверхности (рис. 2.12). Зона усталости расположена там, где относитель-

ное скольжение минимально или равно нулю (зона начальной окружности зуба). Зона более интенсивного износа расположена в местах большего относительного скольжения (головка и ножка зуба).

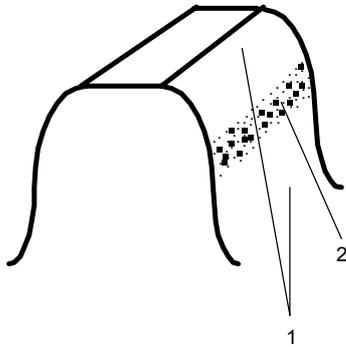


Рис. 2.12. Схема изнашивания зуба шестерни: 1 – зона наибольшего износа; 2 – зона усталостного износа

Таким образом, каждому виду взаимодействия поверхностей соответствует характерный вид повреждения. Сложность количественной оценки степени повреждения деталей усугубляется еще и тем, что оно может распространяться на весь объем материала (или на всю поверхность) детали, а может носить локальный характер.

Все методы оценки степени износа подразделяются на две группы:

- непосредственного измерения повреждения;
- оценка повреждения по изменению выходных параметров.

В первом случае выбираются численные критерии для непосредственного измерения величины повреждения. Так, например, измеряются износы, деформации, глубина и размеры каверн и т.д. Из наиболее известных методов непосредственного измерения следует прежде всего отметить методы микрометрирования, снятия профилограмм, искусственных баз, по уменьшению массы детали.

Метод микрометрирования основан на измерении детали до и после цикла испытаний с помощью микрометров, индикаторов или других приборов, точность которых обычно находится в пределах 1 – 10 мкм. Метод относится к традиционным методам измерения размеров, и к его достоинствам следует отнести простоту и несложность используемого инструмента.

К недостаткам метода относятся:

– невозможность измерения износа в процессе работы автомобиля и необходимость, как правило, частичной разборки узла и демонтажа измеряемой детали;

– изменение размера может быть следствием не только изнашивания поверхности, но и результатом деформации (измерение износа в этом случае носит условный характер).

При испытаниях двигателей широкое распространение получил *метод оценки износа с помощью профилограмм*. Этот метод является разновидностью микрометрирования, используется в основном при исследовательских испытаниях и позволяет с большой степенью точности оценить распределение износа по всему профилю поверхности. В качестве средств измерения применяются различные профилографы.

С помощью этого метода определяют износы стенок цилиндров двигателя, поршневых пальцев, отверстий в бобышках поршней, шеек колен-

чатых и распределительных валов и других деталей. Оценка степени повреждения проводится путем совмещения профилограмм, снятых с поверхности детали до и после цикла испытаний. Отклонение в размерах между профилограммами показывает величину износа (рис. 2.13).

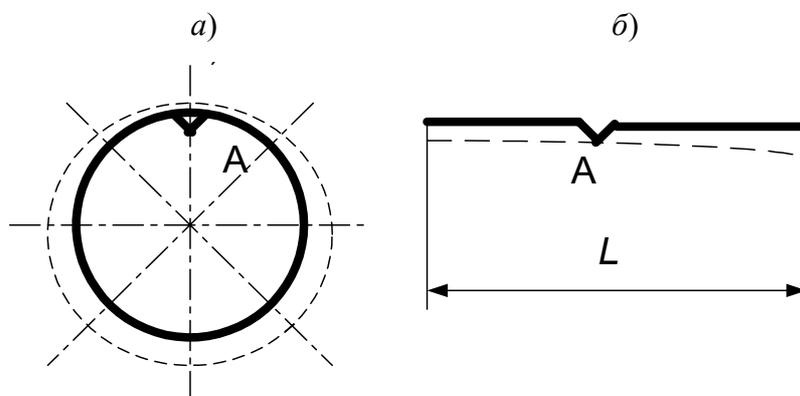


Рис. 2.13. Схемы совмещения профилограмм:
 а – гильзы цилиндров двигателя; б – шейки вала
 в продольном сечении; А – метка для совмещения;
 L – длина измеренного участка; — исходный профиль;
 - - - - - профиль после цикла испытаний

Одним из наиболее совершенных методов непосредственного измерения износа является *метод искусственных баз*, который заключается в том, что на поверхности трения выдавливают или вырезают углубление заданной формы и по уменьшению углубления судят о величине износа (рис. 2.14).

Метод искусственных баз позволяет с высокой точностью (1,5 – 2 мкм) определить величину износа или интенсивность изнашивания при значительно меньших пробегах по сравнению с методом микрометрирования.

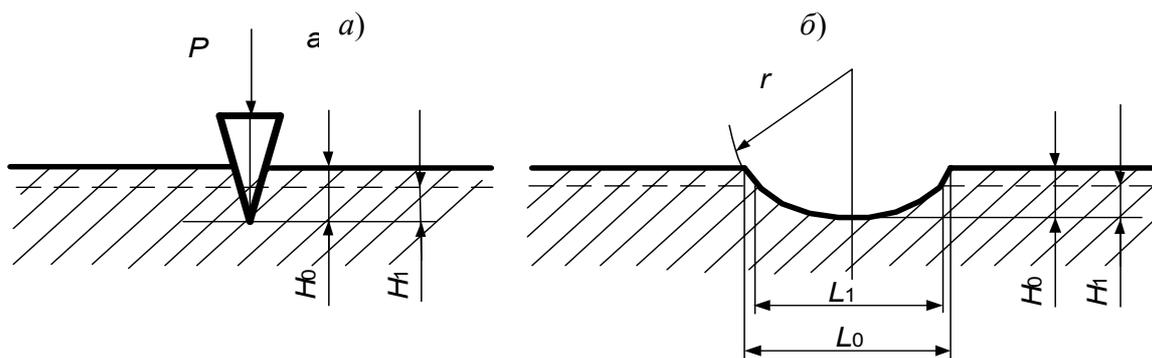


Рис. 2.14. Схема измерения износа методом искусственных баз:
 а – выдавливание алмазной пирамидой; б – вырезание лунки вращающимся резцом;
 P – усилие вдавливания; r – радиус лунки; H_0 и H_1 – начальная и конечная глубина
 углубления; L_0 и L_1 – начальная и конечная длина лунки

Метод поверхностной активации заключается в том, что небольшой участок поверхности исследуемой детали подвергается радиоактивному

облучению (обычно это пятно диаметром 5 мм и глубиной 0,05 – 0,4 мм). В процессе испытаний по мере изнашивания пропорционально снижается радиоактивное излучение, которое измеряется специальным счетчиком.

Метод поверхностной активации предназначен для контроля износа деталей при стендовых и дорожных испытаниях без разборки и остановки машины. Его использование позволяет измерять малые износы, что существенно сокращает продолжительность износных испытаний, исследовать динамику изнашивания, автоматизировать операции контроля. Небольшой уровень радиации не требует специальной радиационной защиты.

При испытаниях ДВС широкое применение получил интегральный метод определения износа *по содержанию продуктов изнашивания в масле*. Метод основан на взятии пробы в отработанном масле, где накопились продукты износа, представляющие собой металлические частицы, окислы металлов и продукты химического взаимодействия металлов с активными компонентами смазки. Концентрация продуктов изнашивания $K_{\text{пи}}$ через определенную продолжительность работы двигателя стабилизируется на уровне

$$K_{\text{пи}} = \frac{q}{q_{\text{ф}} + q_{\text{у}}}, \quad (2.13)$$

где q , $q_{\text{ф}}$, $q_{\text{у}}$ – соответственно интенсивность поступления продуктов изнашивания в масло, интенсивность их задержки фильтрующими элементами и интенсивность их убывания из-за угара масла.

Для объективной оценки степени износа целесообразно иметь для

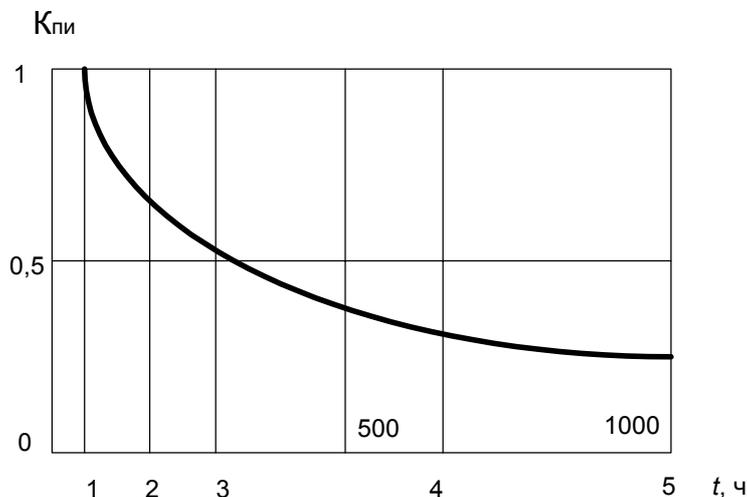


Рис. 2.15. Изменение концентрации продуктов изнашивания двигателя в масле: 1 – новый двигатель; 2 – после наработки 100 ч; 3 – после наработки 300 ч; 4 – после наработки 600 ч; 5 – после наработки 1000 ч

каждого типа двигателя зависимость изменения концентрации $K_{\text{пи}}$ по наработке (рис. 2.15).

Кривая показывает, что в период приработки при отсутствии дефектов интенсивность изнашивания постепенно уменьшается и на определенной наработке стабилизируется. Для получения достоверных результатов пробы масла

должны отбираться на прогретом двигателе не позднее чем через 20 мин после его остановки.

При анализе пробы наибольшее распространение получил спектральный анализ масла, который обеспечивает наибольшую достоверность оценки износа. Присутствие в масле железа свидетельствует об изнашивании цилиндров, алюминия – поршней, хрома – колец, свинца – подшипников коленчатого вала.

Чтобы повысить точность и достоверность оценки степени износа по анализу продуктов изнашивания, необходимо учитывать их содержание не только в масле, но и в отложениях фильтра очистки.

Методы определения износа *по изменению выходных параметров* не требуют разборки агрегата или узла и поэтому весьма перспективны для оценки их технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Так, например, о степени повреждения многих узлов трения можно судить по возрастанию температуры и коэффициента трения. Износ цилиндро-поршневой группы двигателя оценивают по угару масла, падению давления в конце такта сжатия (компрессии), изменению состава отработавших газов и др.

Для гидро- и пневмоаппаратуры о процессе изменения технического состояния судят по герметичности – основному выходному параметру таких устройств.

Таким образом, метод позволяет оценить значения износов или других повреждений изделия по изменению его выходных параметров, минуя этап их непосредственного измерения (рис. 2.16).



Рис. 2.16. Схема оценки степени повреждения по изменению выходных параметров

Оценка степени повреждения по выходным параметрам чаще применяется для сложных изделий, когда на эти параметры влияют несколько процессов, одновременно протекающих в разных элементах конструкции.

Например, при оценке технического состояния насоса в результате износа ряда его элементов (плунжеров, клапанов и др.) измеряют такие его выходные параметры, как производительность, давление, развиваемое на выходе, равномерность подачи жидкости.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные причины, вызывающие отказы и повреждения машин.
2. Какие физические процессы приводят к усталостному разрушению? Какие факторы влияют на этот процесс?
3. Что такое коррозионное разрушение?
4. Раскройте физическую сущность изнашивания.
5. Приведите классификацию видов изнашивания.
6. Какие стадии включает в себя классическая форма кривой изнашивания?
7. Как влияют на интенсивность изнашивания вид трения и смазки?
8. Объясните зависимость изнашивания от давления на поверхность трения и скорости относительного перемещения.
9. Какие механические характеристики и геометрические параметры деталей оказывают наибольшее влияние на интенсивность изнашивания?
10. Назовите основные методы определения износа.
11. Каким образом определяют предельные и допустимые износы деталей и сопряжений?

Глава 3. ИСПЫТАНИЯ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ

3.1. Цель и виды испытаний изделий машиностроения

Испытания на надежность являются обязательным и неотъемлемым этапом разработки и изготовления машин. Высокого качества невозможно достичь без проведения всесторонних испытаний агрегатов, узлов, деталей, а также машины в целом.

Цель таких испытаний – экспериментально оценить фактические показатели надежности. Только объективная информация о фактических показателях надежности, причинах и характере отказов, деталях, лимитирующих надежность агрегатов, может стать основой для разработки мероприятий по улучшению их качества. Такая информация необходима для управления надежностью на всех этапах проектирования, производства и эксплуатации машин.

Источниками информации о надежности автомобиля являются расчеты при проектировании, стендовые и дорожные испытания, причем относительное значение каждого из них меняется на различных стадиях его создания (рис. 3.1).

Как видно из приведенной схемы, на начальной стадии создания автомобиля (проектирование и конструкторские расчеты) сведений о его надежности мало. По мере проведения самых различных испытаний объем информации постепенно возрастает и достигает максимума только после проведения эксплуатационных испытаний.

Таким образом, испытания на надежность – необходимый этап создания любой машины, тем более, что методы расчета при их проектировании развиваются и совершенствуются на основе информации, полученной при испытаниях и эксплуатации. В зависимости от стадии их проведения они подразделяются на доводочные, приемочные, исследовательские 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 уровня. На рис. 3.2 схематично показаны результаты доводки узла, состоящего из четырех деталей.

После доводки γ -процентные ресурсы всех деталей увеличились и удовлетворяют заданному γ -процентному ресурсу узла (предполагается, что формы кривых распределений после доводки не изменились).

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 вполне соответствует требованиям производства.

После начала серийного производства доводка изделий продолжается. На этом этапе она направлена на устранение тех недостатков, которые не были замечены на опытных образцах или возникли вследствие различного рода ошибок технологии серийного производства (ранние отказы). По мере увеличения наработки машин проявляются более поздние отказы, которые также становятся предметом доводочных работ.

Исследовательские испытания применяются для углубленного изучения свойств изделий и факторов, влияющих на уровень надежности. К задачам таких испытаний относятся: определение законов распределения



Рис. 3.1. Схема изменения объема информации о надежности изделия на стадиях: 1 – расчеты при проектировании; 2 – доводочные испытания; 3 – испытания серийной партии; 4 – эксплуатационные испытания

ресурсов и 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. Исследовательские испытания широко применяют при разработке новых моделей машин, совершенствовании серийно выпускаемых изделий, оценке

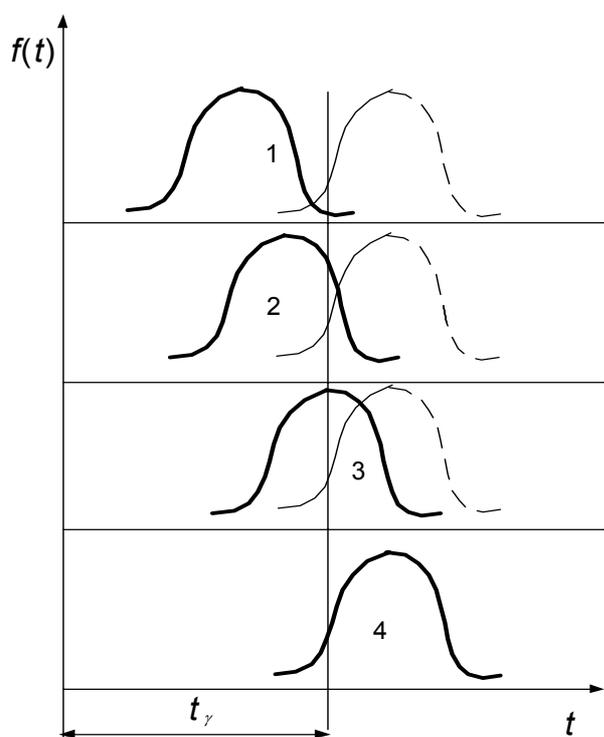


Рис. 3.2. Распределение ресурсов четырех деталей узла: — до доводочных испытаний; --- после доводки — t_γ — заданный γ -процентный ресурс узла

новых материалов и технологических процессов, анализе влияния внешней среды на надежность и т.д.

Следует подчеркнуть особую роль исследовательских испытаний в постоянном совершенствовании типовых элементов машин. Если процесс доводки конструкций занимает сравнительно небольшие промежутки времени, ограниченные периодами подготовки машины к производству и ее серийного выпуска, то процесс совершенствования большой группы типовых деталей, узлов, агрегатов, проверенных временем, практически нескончаем. Множество постепенных улучшений приводят к созданию надежных типовых элементов машин, широко используемых при создании новых

конструкций. По существу, это процесс тщательной доводки элементов машин, поэтому не всегда можно отделить доводочные испытания от исследовательских.

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

3.2. Испытания автомобилей на надежность в процессе их эксплуатации

Наряду с испытаниями, проводимыми для подготовки машин к серийному производству (доводочные, приемочные, исследовательские и др.), обязательным этапом являются их испытания в процессе эксплуата-

ции. Именно эксплуатация является главной проверкой как надежности, так и функциональных свойств любых изделий машиностроения, выявляющей все недостатки, в том числе не проявившиеся при ранее выполненных испытаниях, а также при изготовлении.

Если до начала серийного производства испытаниям подвергают лишь небольшие группы изделий, то эксплуатации подвергается каждое изделие, изготовленное по серийной технологии. Общее количество таких изделий может достигать десятков тысяч, а для массового производства – сотен тысяч. Поэтому итоговую оценку о свойствах автомобиля данной модели выносят на основании информации о надежности, изучаемую в процессе их эксплуатации.

К автомобилям как транспортным средствам повышенной опасности предъявляются ужесточенные требования с позиции надежности. В связи с этим испытания автомобилей на надежность имеют некоторую специфику. Их можно подразделить на два основных вида: *дорожные и стендовые*.

В свою очередь дорожные испытания подразделяются:

- на эксплуатационные;
- полигонные;
- специальные.

3.2.1. Эксплуатационные испытания

Наиболее объективную и исчерпывающую информацию о надежности автомобилей и его отдельных элементов дают эксплуатационные испытания, которые проводят в типичных условиях эксплуатации с присутствием им транспортной работой. При таких испытаниях на автотранспортном предприятии выделяется специальный персонал для тщательного учета всех факторов, определяющих надежность автомобиля. 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 автомобиля к проведению ТО и ремонта;
- разработка нормативов поддержания автомобилей в работоспособном состоянии.

В процессе таких испытаний неукоснительно выполняется инструкция по эксплуатации автомобилей, регистрируются простои и поломки.

Все неисправности, отказы фиксируют с указанием наработки до восстановления или замены с момента ввода автомобиля в эксплуатацию до КР или списания.

Однако, несмотря на все преимущества, эксплуатационные испытания обладают серьезным недостатком – большой длительностью. Если, например, ресурс автомобиля 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.

В связи с этим часто используется метод эксплуатационных испытаний на назначенной наработке. Например, можно отобрать в группу автомобили, имеющие к началу испытаний наработку 50 – 60 тыс. км, 70 – 80 тыс. км и т.д. При этом несложно обеспечить приемлемую численность выборки и практически в течение одного года получить информацию о показателях надежности по большой наработке.

Специфический вид эксплуатационных испытаний – регистрация данных о техническом состоянии автомобилей в процессе ТО и ремонта. Такой вид испытаний позволяет получить исчерпывающую информацию о надежности автомобилей как за гарантийный, так и послегарантийный периоды эксплуатации.

3.2.2. Полигонные испытания

Получение информации о надежности автомобильной техники, являющейся основой оценки качества, требовало все более увеличивающихся испытательных пробегов, затрат труда и, что самое главное, непомерно длительного времени. Но для непрерывного совершенствования конструкций, быстрой смены моделей на более надежные требовались более сжатые сроки.

Необходимость ускорения испытаний привела к развитию *полигонных испытаний* автомобилей и их агрегатов с целью оценки возможного ресурса и ускоренного выявления слабых мест. Поэтому уже к началу 50-х годов прошлого столетия практически все крупные автомобилестроительные фирмы за рубежом располагали развитыми испытательными полигонами.

В отечественном автомобилестроении Центральный автополигон НАМИ был введен в эксплуатацию в 1964 г. и по своей оснащенности, объемам испытаний занял место одного из крупнейших в мире. Впоследствии, учитывая масштабы и содержание испытательной деятельности, полигон был преобразован в Научно-исследовательский центр по испытаниям и доводке автотехники – НИЦИАМТ.

Проблема ускорения и форсирования испытаний на полигонах решается путем воздействия на элементы автомобиля увеличенных нагрузок и сокращения их времени.

Обобщение результатов испытаний показывает, что в большинстве случаев базовые детали автомобилей повреждаются не из-за недостаточ-

ной статической прочности, а в результате накопления усталости в материале от переменных повторяющихся нагрузок. Зародившиеся первоначально усталостные микротрещины в материале под действием многих тысяч циклов переменной нагрузки развиваются в макротрещины и приводят к разрушению. Выявить показатели безотказности и долговечности тех или иных узлов, агрегатов или автомобиля в целом позволяют испытания на специальных дорогах полигона.

«Шашечная» испытательная дорога – дорога с неровной твердой поверхностью (булыжная или брусчатая, с неровностями в виде брусьев, уложенных поперек полотна) предназначена в основном для ускорения проверки долговечности деталей подвески, рамы и других деталей ходовой части, а также кузова. Основным размером профиля является высота отдельных неровностей, которая достигает 10 см. Общее количество неровностей на 1 км дороги – 1250. Движение по таким дорогам сокращает продолжительность испытаний примерно в 20 раз по сравнению с эксплуатационными.

Испытательная дорога с косыми волнами предназначена для ускоренного испытания на долговечность узлов и деталей рулевого управления. Интенсивность воздействия на детали рулевого привода зависит от угла между направлением движения автомобиля и образующей профиля неровности. При уменьшении угла интенсивность воздействия на детали рулевого управления возрастает. Для увеличения нагрузки на детали рулевого привода, не увеличивая высоту неровностей более 7 см, их располагают под углом 45° к оси дороги. При этом достигают нагрузки деталей рулевого управления в 3 – 5 раз больше, чем при движении по поперечно расположенным неровностям той же высоты.

Скоростная испытательная дорога с асфальтобетонным покрытием, с плавными поворотами и продольными профильными уклонами, характерными для скоростных автомагистралей, предназначена для ресурсных испытаний автомобилей и автопоездов. Движение по ним на максимальных и близких к ним скоростях позволяет в короткий срок оценить надежность двигателей, подшипников трансмиссии и ступиц колес, шин, уплотнителей вращающихся деталей и т.д.

Дорога с покрытием из крупного булыжника предназначена для ускоренной проверки прочности конструкции автомобиля, выявления слабых агрегатов, узлов и деталей, что достигается созданием непрерывных динамических нагрузок различной частоты, действующих на колеса в разных плоскостях.

Ухабистая испытательная дорога используется для форсированных испытаний на прочность рам, несущих корпусов, кабин, балок мостов.

Характерными деформациями, определяющими долговечность несущих систем автомобиля, считаются изгибы в продольной и поперечной плоскостях и скручивание. Эти деформации выделены и циклически повторяются

по определенной программе при движении автомобиля через последовательно расположенные серии прямых, косых и клиновых холмов.

Таким образом, в зависимости от цели испытаний полигон НИЦИАМТ имеет весь набор специальных испытательных дорог для ускоренного получения необходимой информации о надежности автомобилей.

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.). Длительность таких испытаний в зависимости от типа автомобилей представлена в табл. 3.1.

Из таблицы видно, что продолжительность ресурсных полигонных испытаний в 2 – 3, а при форсированных – в 10 и более раз меньше времени полной реализации ресурса в эксплуатации.

На полигоне разработаны также методики проведения дорожных испытаний автомобилей, при которых их пробег равен ресурсу до капитального ремонта. Такие испытания при ресурсе, например 300 тыс. км, проводятся ускоренно в течение времени, немногим более полугода за счет непрерывной эксплуатации автомобиля несколькими экипажами.

Таблица 3.1

Тип автомобиля	Срок службы до капитального ремонта, г.	Продолжительность полигонных ресурсных испытаний, г.	
		нормальных	форсированных*
Легковой	5 – 6	1 – 1,5	0,4 – 0,5
Автобусы	8 – 10	2 – 3,5	1,0 – 1,5
Грузовой	10	2 – 3	1,0 – 1,5
Многоцелевой	6	2 – 3	1,5 – 2,0

*Форсирование при полигонных испытаниях осуществляется за счет переменных механических нагрузжений, коррозионных воздействий, абразивного воздействия в зонах трения и др.

3.2.3. Специальные испытания

Специальные испытания автомобилей проводятся, как правило, при небольших пробегах на тех режимах движения и при той нагрузке, которые определяются целями данных испытаний. Если при эксплуатационных или полигонных испытаниях автомобиль оборудуется сравнительно небольшим количеством измерительной аппаратуры, то при проведении специальных испытаний для получения максимума информации о тех нагрузках, которые воздействуют на исследуемые агрегат или деталь, такой аппаратуры достаточно много (датчики, месдозы, акселерометры и т.д.).

Специальные испытания проводятся на обычных автомобильных дорогах и преследуют цель исследовать факторы, влияющие на надежность того или иного агрегата автомобиля. Протяженность таких испытаний составляет обычно от 60 до 80 км.

Данные специальных испытаний после обработки используются для воспроизведения эксплуатационных условий в стендовых испытаниях.

3.3. Стендовые испытания

Стендовые испытания агрегатов, узлов, отдельных деталей получают все большее развитие, постепенно заменяя при решении ряда технических вопросов дорожные испытания. Особенно возросло значение стендовых испытаний на долговечность и усталостную прочность различных элементов конструкций автомобилей.

Испытания на стендах отличаются от других видов испытаний (полигонных, эксплуатационных, специальных) высокой стабильностью задаваемых и поддерживаемых условий нагружения, температуры, влажности и других факторов, влияющих на функционирование конструкции, возможностями углубленных наблюдений за рабочими процессами, повышенной точностью их измерения и регистрации. На стендах возможно получить информацию, которую не могут дать никакие иные испытания, например, графики кривых усталости, показатели прочности деталей и др.

Анализ эксплуатационных отказов показывает, что основными причинами, ограничивающими долговечность узлов и деталей автомобиля, являются усталостное разрушение и изнашивание. Обычно эти процессы развиваются одновременно и взаимосвязанно. Поэтому при проведении обычных эксплуатационных испытаний зачастую невозможно получить точные количественные оценки для выработки мероприятий по повышению усталостной прочности и износостойкости элементов до необходимых значений. В связи с этим целесообразнее испытывать сопряжения или детали, раздельно воспроизводя в стендовых условиях износ или усталость.

На стендах испытывают практически все агрегаты автотранспортных средств (АТС): двигатели, сцепления, коробки передач, карданные передачи, рулевые управления, ведущие мосты, рамы, кузова, кабины, подвески, и т.д. Для таких испытаний используют различные стенды индивидуального изготовления или серийные, выпускаемые специализированными предприятиями, фирмами. На рис. 3.3 и 3.4 показаны две схемы современных испытательных стендов. В обоих случаях условия испытаний максимально приближены к условиям эксплуатации, так как обеспечивается возможность управления процессом по специальным программам. Одновременно обеспечиваются минимальные затраты энергии, подводимой к стендам, благодаря замкнутости силовых контуров.

Кроме испытаний агрегатов автомобилей большое распространение получили стендовые испытания отдельных сборочных единиц и узлов в целях экспериментальной отработки элементов конструкций и сопряжений, для которых практически невозможно установить параметры надежности расчетным путем. Схемы стендов для испытаний некоторых сборочных единиц представлены на рис. 3.5.

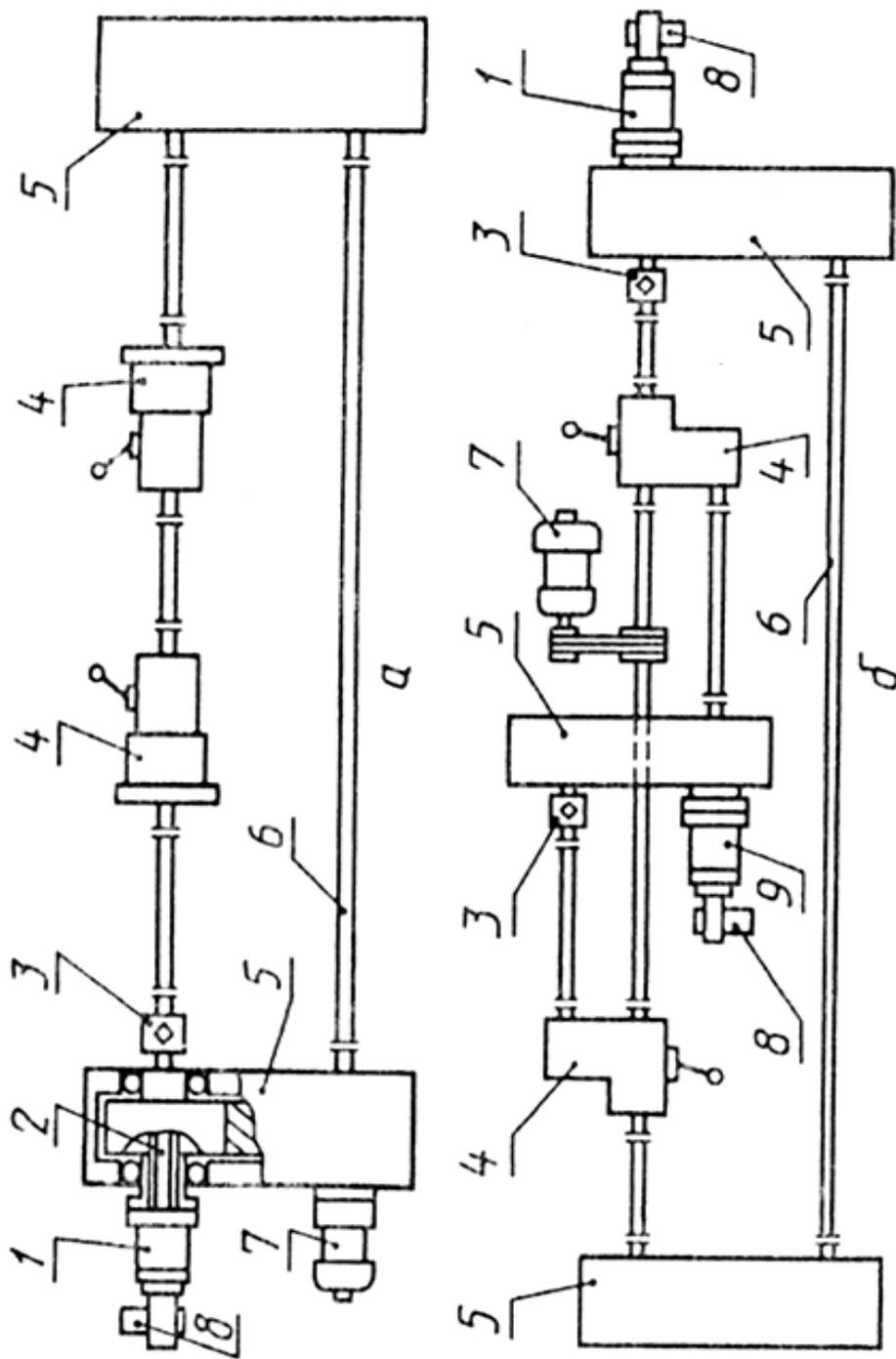


Рис. 3.3. Схемы установок фирмы «Шенк» для стендовых испытаний коробок передач:

а – без отбора мощности; б) с валом отбора мощности:

1 и 2 – статор и вал ротора поворотного цилиндра; 3 – крутильный динамометр;
 4 – испытываемые коробки; 5 – зубчатые передачи замыкания контура нагружающего
 момента; 6 – вал затяжки контура; 7 – привод вращения; 8 – электродроссельный
 усилитель поворотного гидроцилиндра закрутки кинематической цепи (нагружения);

9 – поворотный гидроцилиндр нагружения валов отбора мощности

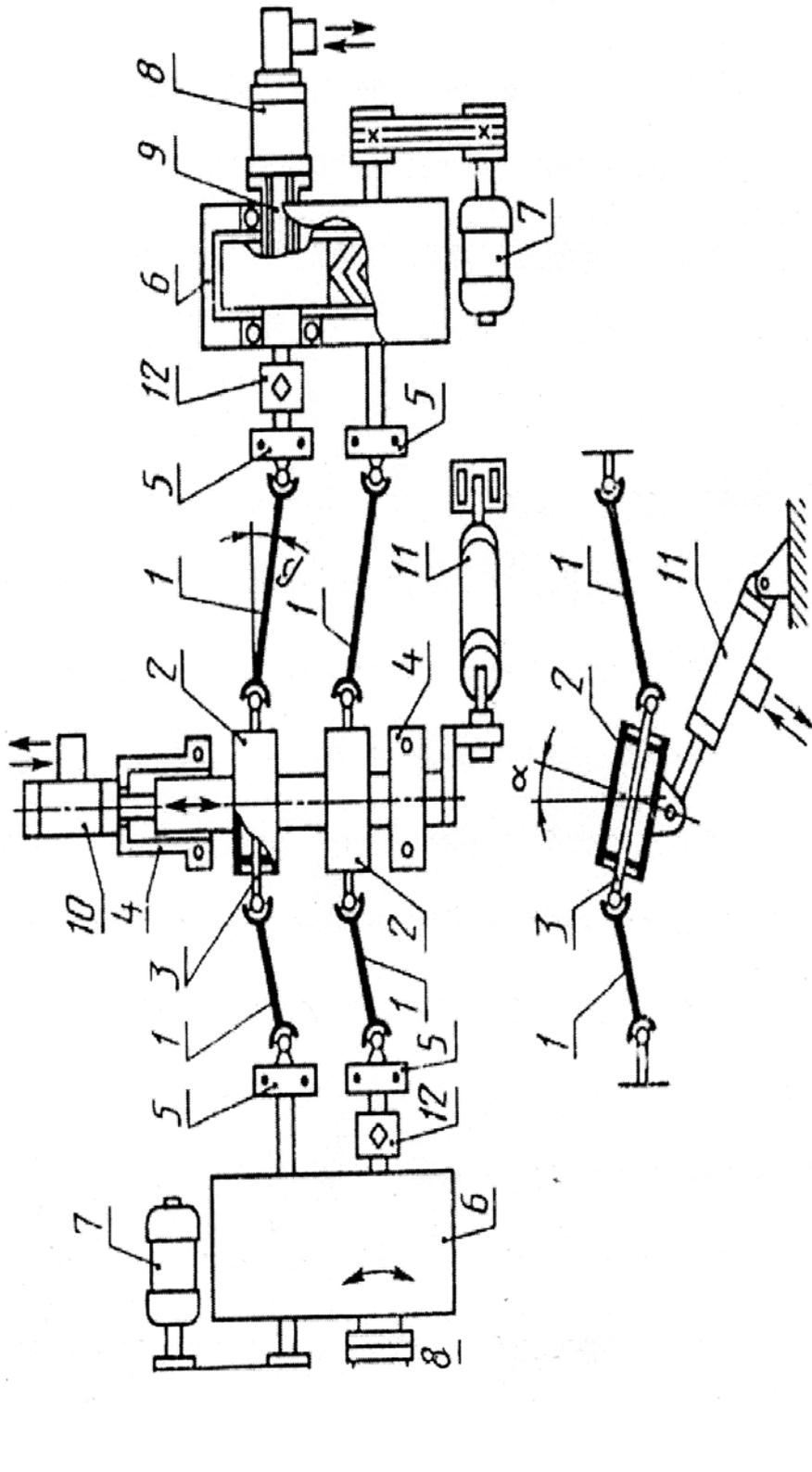


Рис. 3.4. Схема машины фирмы «Шенк» для совместных испытаний четырех карданных валов при переменных: вращательных нагрузках, вертикальных и горизонтальных углах передачи момента (по задаваемой программе): 1 – испытываемые валы; 2 – обоймы промежуточных валов; 3 – промежуточные валы; 4 – подшипники цапфы обойм промежуточных валов; 5 – захватные опоры; 6 – зубчатые передачи; 7 – привод вращения; 8 – статор поворотных гидроцилиндров нагружения в контуре; 9 – вал ротора поворотного гидроцилиндра; 10 – гидроцилиндр возвратно-поступательного движения для имитации относительного перемещения кузова и моста; 11 – гидроцилиндр имитации поворотов управляемых колес; 12 – динамометры

Большим преимуществом испытаний простейших сопряжений и узлов является возможность использования универсальных испытательных стендов.

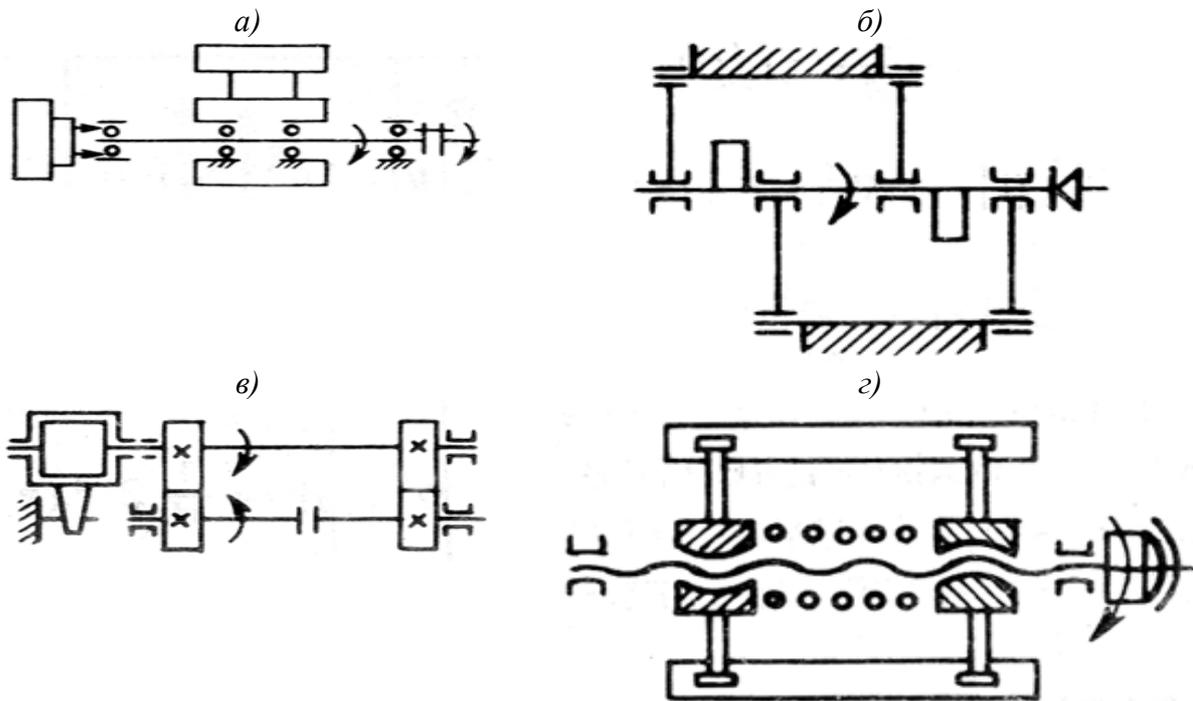


Рис. 3.5. Схемы стендов для испытаний сборочных единиц (узлов):
 а – подшипников качения; б – коленчатых валов с коренными и шатунными подшипниками; в – зубчатых передач; г – ходовой пары винт – гайка

3.4. Ускоренные испытания

Для сокращения сроков освоения новых моделей автомобилей и экономии средств, идущих на испытания, огромное значение приобретает проблема ускорения испытаний на надежность.

Длительность испытаний изделий определяется отрезком времени от начала постановки их на место проведения до момента, когда полученная информация становится достаточной для выполнения целей и задач, намеченных программой. Наибольшую длительность, как уже отмечалось, имеют эксплуатационные испытания, по сравнению с которыми и рассматриваются различные виды ускорения.

Для автотранспортной техники ближайшими по содержанию, объему и качеству информации к испытаниям в условиях эксплуатации, но существенно ускоренными являются полигонные испытания.

Еще большее сокращение длительности достигается при стендовых испытаниях, но преимущественно по отдельным агрегатам, узлам, деталям. Эффективность этих испытаний проявляется на этапе доводки конструкции. Основные факторы ускорения стендовых испытаний – непрерывность процесса нагружения, одновременное испытание возможно большего числа изделий, сокращение простоев и т.д.

Кроме этого ускорение испытаний может быть достигнуто за счет повышения точности измерения выходных параметров. При износных отказах, например, не всегда в процессе испытаний необходимо доводить износ детали до предельного состояния. Часто достаточно знать скорость процесса изнашивания, если дальнейшее его протекание во времени определяется известными закономерностями.

Такие методы, как метод радиоактивных изотопов, измерения износов с помощью лазерной техники, применение высокочувствительных датчиков позволяют оценить с достаточной степенью точности скорость процесса при незначительных изменениях исходных параметров изделия.

Дальнейшее ускорение получения информации о надежности автомобилей потребовало разработки различных методов *форсированных испытаний*, основанных на интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения за счет более высоких скоростей, нагрузок, температур и других элементов режима работы изделия. Для автотранспортных средств разработаны такие методы форсирования испытаний, как переменное механическое нагружение, коррозионная среда и абразивное воздействие в зонах трения.

Форсирование механических нагрузок на детали и узлы, подверженные усталостному разрушению, – это повышение их абсолютных значений и частоты воздействий. Горьковский автомобильный завод при доработке главной передачи проводит форсирование испытаний методом резких троганий с места на первой передаче и передаче заднего хода. Главная передача выдерживает до разрушения 1,5 – 3 тыс. циклов.

В НАМИ при ресурсных испытаниях сцеплений используется следующая методика. Автопоезд с полной нагрузкой устанавливается на подъеме 8 %, затем 10 раз трогается с места на второй передаче с интервалом 30 с. В течение 15 мин сцепление охлаждается, и цикл повторяется. За 6 циклов (60 троганий с места) накладки сцеплений достигают предельного состояния.

При форсировании коррозионных процессов испытания проводятся в коррозионных камерах по специальной методике, предусматривающей следующие этапы:

– подготовка кузова (проверка качества и толщины лакокрасочного покрытия, искусственное нанесение очагов коррозии);

– проведение ежедневных циклов испытаний, состоящих из выдержки автомобиля в камере в течение 6 ч, проезда через ванну, заполненную 5%-ным соевым раствором на глубину 100 мм, проезда по пыльным дорогам.

Такие испытания позволяют в короткие сроки оценить эффективность конструкторских и технологических мероприятий по защите автомобилей от воздействия коррозии и разработать методы по повышению коррозионной стойкости кузовов. На рис. 3.6 показан характерный пример результатов наблюдений за развитием коррозионного повреждения по ширине каверны при испытаниях по приведенной методике.

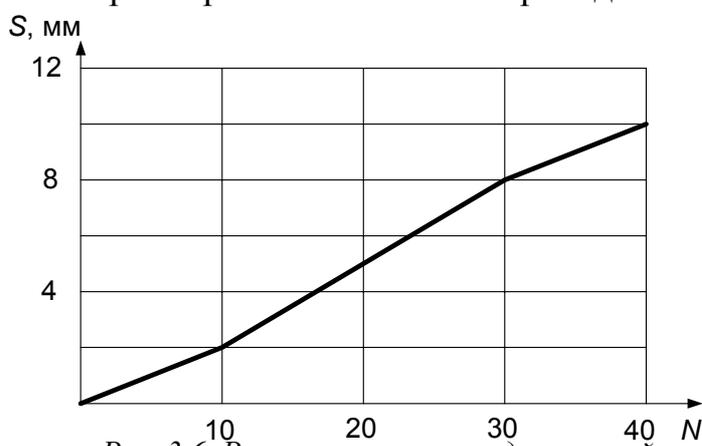


Рис. 3.6. Распространение подпленочной коррозии в каверне на передних дверях легкового автомобиля: N – число циклов испытаний; S – ширина распространения, мм

Как видно из графика, распространение коррозионного повреждения в зависимости от количества циклов испытаний носит такой же линейный характер, как и в условиях реальной эксплуатации в зависимости от времени.

Абразивное воздействие на трущиеся поверхности деталей применяют для существенного сокращения длительности ресурсных испытаний. Абразивные частицы

попадают на трущиеся поверхности в основном с воздухом в виде частиц пыли. Запыленность воздуха является также одной из основных причин загрязнения топлива и масла.

Среди различных видов изнашивания преобладающее значение для автомобильных конструкций имеет абразивное, причем абразивная составляющая в общем эксплуатационном износе, например деталей двигателя, для условий средней полосы России достигает 80 %.

Абразивные форсированные испытания автомобилей проводятся в сооружениях с искусственной пылевой средой – пылевой камере. Продолжительность таких испытаний определяется параметрами и характери-

стиками искусственной среды (характеристиками пыли), скоростью воздушно-пылевого потока и величиной запыленности воздуха.

Наиболее подвержен абразивному изнашиванию при работе автомобиля в запыленной среде двигатель. Интенсивность или скорость его абразивного повреждения определяется износом цилиндров по наработке. Нормативно-технической документацией на различные модели двигателей устанавливаются предельный износ гильз цилиндров и соответствующий пробег для первой категории условий эксплуатации. Для ряда двигателей отечественного производства результаты испытаний представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Модель двигателя	Показатель			
	Нормативный ресурс двигателя, тыс. км	Предельный износ цилиндров, мкм	Интенсивность форсированного изнашивания цилиндров, мкм/1000 км	Суммарная продолжительность испытаний за ресурсный пробег, ч
ВАЗ-2121	100	150	1,58	48
ЗМЗ-24	200	300	0,76	22,6
ЗМЗ-53	200	300	0,49	39,1
ЗИЛ-130	200	350	–	–
ЯМЗ-236	300	350	1,75	13,4
КамАЗ-740	300	350	0,78	17,7

Форсированные испытания автомобилей существенно сокращают длительность получения информации о надежности даже по сравнению с полигонными (см. табл. 3.1). Следует, однако, отметить, что предельные значения параметров форсирования должны выбираться из условия сохранения физической сущности процесса, из-за которого автомобиль теряет свою работоспособность, т.е. чтобы вид и характер разрушения при работе на повышенных режимах был идентичен виду и характеру разрушения при нормальных условиях эксплуатации.

Эффективность того или иного метода сокращения длительности испытаний характеризуется коэффициентом ускорения

$$K_y = \frac{T_э}{T_y},$$

где $T_э$, T_y – продолжительность эксплуатационных и ускоренных испытаний соответственно.

Контрольные вопросы

1. Какова основная цель и задачи испытаний машин на надежность?
2. Перечислите виды испытаний изделий на надежность.
3. Какие характеристики надежности автомобилей получают при эксплуатационных испытаниях?
4. Назовите основные преимущества полигонных испытаний.
5. Какую информацию о надежности получают при стендовых испытаниях?
6. Назовите основные методы и способы ускорения испытаний.

Глава 4. СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН

4.1. Определение объема выборки обследований

Без объективной информации о надежности невозможно определить ее фактические показатели, выявить недостатки проектирования и производства изделия, установить влияние на надежность условий эксплуатации.

Такая информация поступает для анализа и обработки по результатам самых разнообразных испытаний (стендовых, полигонных, эксплуатационных, специальных и т.д.).

Наиболее полную информацию о надежности автомобилей и их элементов, как уже отмечалось, дают эксплуатационные испытания. Подконтрольные автомобили при таких испытаниях подбирают в группы, которые характеризуются однородностью своего возрастного состава (новые, после КР) и однородностью условий эксплуатации. Однако, как показывает практика, показатели надежности у разных автомобилей будут тем не менее отличаться друг от друга. Объясняется это влиянием большого числа различных факторов: качества изготовления, погодных условий, квалификации водителей и ремонтно-обслуживающего персонала, применяемых ГСМ и т.д. Таким образом, наработка, при которой возникает отказ, является случайным событием.

Из математической статистики известно, однако, что при многократном повторении наступление случайных событий обладает статистической устойчивостью, которая возрастает с увеличением числа испытуемых объектов. Естественно, при увеличении числа испытуемых изделий повыша-

ется точность оценок статистических характеристик изучаемых величин, и при достаточно большом их числе можно получить сколь угодно малую ошибку.

Однако чрезмерное увеличение объемов обследований приводит к необоснованному перерасходу трудовых и материальных затрат для получения избыточной информации, которая ничего нового о показателях надежности уже не несет.

В связи с этим целесообразно испытать не просто наперед заданное количество объектов, а ту минимальную партию (представительную выборку), которая с заданной точностью позволяет получить достоверные оценки показателей надежности.

Наиболее распространенным методом определения представительной выборки испытаний является метод доверительных интервалов, который заключается в следующем. По предварительным выборочным характеристикам случайной величины (например среднего ресурса $\bar{t}_{\text{ср}}$) определяют верхнюю $t_{\text{в}}$ и нижнюю $t_{\text{н}}$ доверительные границы (рис. 4.1). Эти границы и определяют доверительный интервал, который с некоторой доверительной вероятностью α накрывает значение $\bar{t}_{\text{ср}}$, т.е.

$$\alpha = P(t_{\text{н}} \leq \bar{t}_{\text{ср}} \leq t_{\text{в}}).$$

Ширина доверительного интервала характеризует точность выборочной оценки $\bar{t}_{\text{ср}}$, а доверительная вероятность α – достоверность этой оценки. Чем уже доверительный интервал и больше значение α , тем точнее оценка среднего ресурса.

Для нормального распределения случайной величины ресурса t_i доверительные границы по предварительной выборке испытаний определяются из выражений:

$$t_{\text{н}} = \bar{t}_{\text{ср}} - t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad (4.1)$$

$$t_{\text{в}} = \bar{t}_{\text{ср}} + t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (4.2)$$

где t_{α} – коэффициент Стьюдента, определяемый из таблиц нормального распределения при доверительной вероятности α и числе степеней свободы $k = N - 1$; N – объем предварительной выборки.

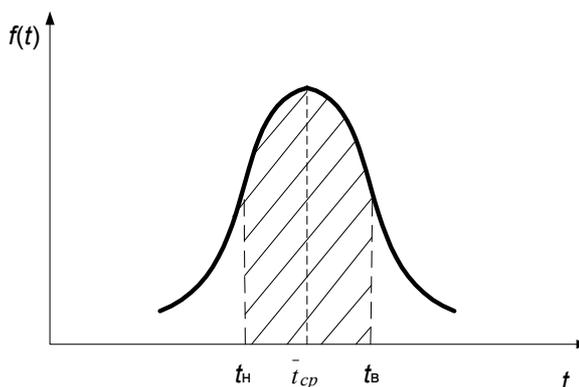


Рис. 4.1. Распределение случайной величины t с доверительными границами

Выражение $t_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \varepsilon$ представляет собой точность (или абсолютную погрешность) оценки $\bar{t}_{\text{ср}}$. Если требуется определить математическое ожидание наработки (ресурса) $\bar{t}_{\text{ср}}$ с заданной точностью ε и достоверностью α , то минимальный объем выборки, который обеспечит эту точность, находится по формуле

$$N = U_p^2 \sigma^2 / \varepsilon^2, \quad (4.3)$$

где U_p – вспомогательная величина (квантиль), определяемая по таблице квантилей нормального распределения в зависимости от $\alpha^* = \frac{1+\alpha}{2}$.

Необходимая точность ε вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \delta \bar{t}_{\text{ср}}, \quad (4.4)$$

где δ – относительная погрешность (для автотранспортных средств принимается в пределах 5 – 10 %).

Подставляя значение ε в формулу (4.3), получим выражение для минимально необходимого объема выборки

$$N = \frac{U_p^2 \sigma^2}{(\delta \bar{t}_{\text{ср}})^2}. \quad (4.5)$$

Пример. При наблюдении за 9 автомобилями были получены следующие наработки t_i (тыс. км) до предельного состояния выпускного клапана двигателя ЗМЗ-4063.10: $t_1 = 90$; $t_2 = 105$; $t_3 = 125$; $t_4 = t_5 = 140$; $t_6 = 170$; $t_7 = 185$; $t_8 = 210$; $t_9 = 230$. Требуется определить необходимый объем выборки обследования с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и относительной погрешностью $\delta = 10\%$.

1. Вычисляем среднее арифметическое значение наработки выпускного клапана $\bar{t}_{\text{ср}}$ до предельного состояния и среднее квадратическое отклонение

$$\begin{aligned} \bar{t}_{\text{ср}} &= \frac{1}{N} \sum_1^9 t_i = \frac{1}{9} (90 + 105 + \dots + 230) = 171,9 \text{ тыс. км;} \\ \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_1^N (t_i - t_{\text{ср}})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{(90-171,9)^2 + (105-171,9)^2 + \dots + (230-171,9)^2}{9-1}} = \\ &= 50,5 \text{ тыс. км.} \end{aligned}$$

2. Определяем значение вспомогательной величины U_p . При заданной доверительной вероятности $\alpha = 0,95$

$$\alpha^* = \frac{1 + \alpha}{2} = \frac{1 + 0,95}{2} = 0,975.$$

По таблице квантилей нормального распределения для $\alpha^* = 0,975$ величина $U_p = 1,96$.

3. При относительной погрешности $\delta = 10\%$ минимально необходимый объем выборки составит

$$N = \frac{U_p^2 \sigma^2}{(\delta t_{\text{cp}})^2} = \frac{1,96^2 \cdot 50,5^2}{(0,1 \cdot 171,9)^2} = 33 \text{ ед.}$$

Если ужесточить величину относительной погрешности при оценке \bar{t}_{cp} , например до 5% , то необходимый объем выборки для нашего примера составит

$$N = \frac{1,96^2 \cdot 50,5^2}{(0,05 \cdot 171,9)^2} = 52 \text{ ед.}$$

Таким образом, метод доверительных интервалов позволяет с необходимой точностью и заданной доверительной вероятностью определить представительный объем выборки обследований. Необходимым условием при этом, как уже отмечалось, является знание закона распределения искомой характеристики. При неизвестном законе может быть использована ориентировочная формула определения объема выборки

$$N = \frac{\ln(1 - \alpha)}{\ln(1 - \delta)}. \quad (4.6)$$

Для нашего примера при уровне доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и допустимой относительной ошибке $\delta = 5\%$ необходимый объем выборки составит

$$N = \frac{\ln(1 - 0,95)}{\ln(1 - 0,05)} \approx 58 \text{ ед.}$$

4.2. Определение выборочных характеристик

Для оценки случайной однородной величины используются два вида характеристик: полные и числовые. Полные характеристики – это так называемые *законы распределения*. Для дискретных величин в качестве таковых используют *функцию и ряд распределения* (графически – многоуголь-

ник распределения), для непрерывных величин – функцию и плотность распределения (графически – кривую распределения).

Любой закон распределения представляет собой некоторую функцию, которая полностью описывает случайную величину. Однако в целом ряде инженерных задач нет необходимости характеризовать случайную величину полностью (исчерпывающим образом). Вполне достаточно определить отдельные параметры, характеризующие наиболее существенные черты распределения случайной величины. Такие характеристики, назначение которых – выразить в сжатой форме наиболее существенные особенности распределения, называются числовыми характеристиками случайной величины.

4.2.1. Числовые характеристики случайной величины

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

$$\bar{X} = (X_1 m_1 + X_2 m_2 + \dots + X_k m_k) / n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i m_i, \quad (4.7)$$

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} , определяют по формуле

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 m_i}{n - 1}}. \quad (4.8)$$

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

$$v = \frac{\sigma(x)}{\bar{X}}. \quad (4.9)$$

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

4.2.2. 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 функции распределения случайной величины (законы распределения) $F(X)$ и $P(X)$. Для автотранспортной техники в качестве случайной величины чаще всего используют наработки t (до одного отказа, между отказами, до предельного состояния и т.д.). Поэтому при обработке результатов испытаний различными законами вместо абстрактной случайной величины X используем наработку t .

Интегральная функция распределения $F(t)$ показывает вероятность того, что наработка T от начала отсчета до появления отказа окажется меньше заданной наработки t , т.е.

$$F(T) = \text{Вер} (T < t).$$

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

Интегральная функция $P(t)$ показывает вероятность того, что наработка T от начала отсчета до появления отказа окажется больше или равной заданной наработке t . Иначе говоря, эта функция показывает, что в пределах заданной наработки от 0 до t отказа изделия не произойдет:

$$P(T) = \text{Вер} (T \geq t).$$

Теоретические значения $F(t)$ и $P(t)$ определяют из выражений:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt; \quad P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t), \quad (4.10)$$

где $f(t)$ – дифференциальная функция распределения. Она характеризует плотность, с которой распределяются значения случайной величины в данной точке, и поэтому называется плотностью распределения случайной величины.

Физический смысл $f(t)$ применительно к теории надежности – это вероятность возникновения отказа на достаточно малой наработке.

Таким образом, функции, или законы распределения, устанавливают связи между возможными значениями случайных величин и соответствующими им вероятностями.

Если известна одна из функций $F(t)$, $P(t)$ или $f(t)$, можно определить любую числовую характеристику надежности. Например, средняя наработка до отказа находится из выражений:

$$t_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad \text{или} \quad t_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (4.11)$$

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

Экспоненциальный закон распределения

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

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{при} \quad t \geq 0, \quad (4.12)$$

где λ – параметр закона распределения; 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).

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

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (4.13)$$

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

$$t_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.14)$$

Среднее квадратическое отклонение для экспоненциального закона распределения

$$\sigma = t_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.15)$$

Коэффициент вариации

$$v = \frac{\sigma}{t_{\text{ср}}} = 1. \quad (4.16)$$

Гамма-процентный ресурс (гамма-процентный срок службы, гамма-процентный срок сохраняемости) находится из выражения:

$$t_{\gamma} = \frac{1}{\lambda} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right). \quad (4.17)$$

Из выражений (4.12) и (4.13) следует, что интенсивность отказов λ может быть выражена формулой

$$\lambda = \frac{f(t)}{e^{-\lambda t}} = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (4.18)$$

Нормальный закон распределения

Непрерывная случайная величина t называется нормально распределенной, если ее плотность вероятности имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.19)$$

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

Параметр $t_{\text{ср}}$ характеризует положение распределения на оси абсцисс, а параметр σ форму кривой (рис. 4.2).

Для упрощения вычислений при решении практических задач надежности 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.

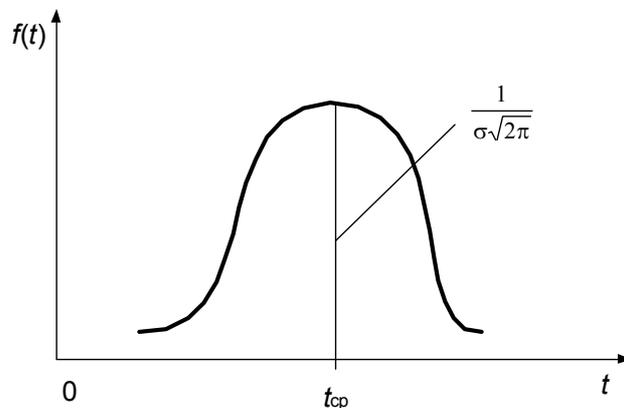


Рис. 4.2. Нормальное распределение с параметрами $t_{\text{ср}}$ и σ

В результате центрирования и нормирования получим новое распределение случайной величины z :

$$f_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}, \quad (4.20)$$

Функция $f_0(z)$ является однопараметрической и ее значения приведены в таблицах нормального распределения. При отрицательных значениях z функция $f(-z) = f(z)$. После того как найдены значения $f_0(z)$, необходимо перейти обратно к функции $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} f_0\left(\frac{t - t_{\text{ср}}}{\sigma}\right). \quad (4.21)$$

Вероятность безотказной работы до возникновения первого отказа вычисляется из выражения

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma}\right), \quad (4.22)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ – функция Лапласа, значения которой приведены в таблицах математической статистики. Эта функция нечетная, т.е. при $\Phi(-z) = -\Phi(z)$.

Вероятность отказа определяется по формуле

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma}\right). \quad (4.23)$$

Интенсивность отказов находится по известной формуле:

$$\lambda = f(t)/P(t).$$

Гамма-процентный ресурс (гамма-процентный срок службы, гамма-процентный срок сохраняемости) определяется из уравнения

$$\frac{\gamma}{100} = 0,5 - \Phi\left(\frac{t_\gamma - \bar{t}_{\text{ср}}}{\sigma}\right). \quad (4.24)$$

Нормальный закон распределения хорошо описывает процессы, на которые влияют большое число независимых факторов, каждый из которых оказывает незначительное воздействие. Ему подчиняются износные отказы, ресурсы агрегатов и отдельных деталей, люфты и зазоры в сочленениях, трудоемкости обслуживания и др.

Логарифмически нормальное распределение

Непрерывная случайная величина t называется распределенной по логарифмически нормальному закону, если логарифм этой величины распределяется по нормальному закону. Плотность распределения имеет вид:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_{\text{л}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - y_0)^2}{2\sigma_{\text{л}}^2}}, \quad (4.25)$$

где y_0 – математическое ожидание логарифма случайной величины; $\sigma_{\text{л}}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма случайной величины.

Параметры y_0 и $\sigma_{\text{л}}$ связаны с математическим ожиданием $t_{\text{ср}}$ и средним квадратическим отклонением σ случайной величины t следующими соотношениями:

$$t_{\text{ср}} = e^{y_0 + \frac{\sigma^2}{2}}; \quad (4.26)$$

$$\sigma = \sqrt{e^{2y_0 + \sigma_{\text{л}}^2} (e^{\sigma_{\text{л}}^2} - 1)}. \quad (4.27)$$

При решении практических задач определения показателей надежности автомобилей плотность распределения вероятности логарифма t определяется по формуле

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_{\text{л}}} f_0\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right), \quad (4.28)$$

где $f_0(z)$ – плотность вероятности нормированного распределения.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа находятся из выражений:

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right), \quad (4.29)$$

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{\ln t - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right). \quad (4.30)$$

Интенсивность отказов (или восстановлений) определяется по формуле (4.18).

Гамма-процентный ресурс (срок службы, сохраняемости) находится из уравнения

$$\frac{\gamma}{100} = 0,5 - 0,5\Phi\left(\frac{\ln t_{\gamma} - y_0}{\sigma_{\text{л}}}\right). \quad (4.31)$$

Логарифмически нормальное распределение хорошо описывает отказы подшипников передних колес, усталостное разрушение деталей при стендовых испытаниях, периодичности крепежных работ и др.

Распределение Вейбулла

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

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} \text{ при } t > 0, \quad (4.32)$$

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

Значения плотностей вероятностей $f(t)$, записанные по этой форме, протабулированы, т.е. представлены в таблицах математической статистики.

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 двигатель кроме блока цилиндров, картера, коленчатого вала, поршней, шатунов входят менее долговечные детали: поршневые кольца, вкладыши, прокладки, уплотнения и т.д. Они отказывают в разные сроки, а наработка двигателя на отказ определяется наиболее слабым звеном.

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 $b \approx 3,3$ – совпадает с нормальным распределением.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение при этом законе распределения находятся по формулам:

$$t_{\text{cp}} = ak_{\text{в}}; \quad (4.33)$$

$$\sigma(t) = aq_{\text{в}}; \quad (4.34)$$

где $k_{\text{в}}$ и $q_{\text{в}}$ – коэффициенты, определяемые из выражений:

$$k_{\text{в}} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad (4.35)$$

$$q_{\text{в}} = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - k_{\text{в}}^2}, \quad (4.36)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Коэффициент вариации случайной величины t определяется по формуле

$$v = \frac{\sigma}{t_{\text{cp}}} = \frac{aq_{\text{в}}}{ak_{\text{в}}} = \frac{q_{\text{в}}}{k_{\text{в}}}. \quad (4.37)$$

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

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

Для удобства вычислений при определении параметра формы b , а также коэффициентов $k_{\text{в}}$ и $q_{\text{в}}$ составлены специальные таблицы [8].

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:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}; \quad (4.38)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \quad (4.39)$$

Интенсивность отказов определяется выражением

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}. \quad (4.40)$$

Гамма-процентный ресурс (срок службы, сохраняемости) находится по формуле

$$\frac{\gamma}{100} = e^{-\left(\frac{t_\gamma}{a}\right)^b}. \quad (4.41)$$

4.3. Статистическая обработка информации о надежности

4.3.1. Порядок обработки опытных данных

В первичной документации, где фиксируются результаты испытаний на надежность, содержатся данные, в которых трудно усмотреть какой-либо порядок и закономерности. Обработка этих данных начинается с составления таблицы, в которой они располагаются в порядке увеличения полученных при испытаниях значений. Затем определяются границы их рассеивания, т.е. наибольшее t_{\max} и наименьшее t_{\min} значения. Разность между ними является размахом варьирования

$$R = t_{\max} - t_{\min}. \quad (4.42)$$

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

$$k = 1 + 3,32 \lg N, \quad (4.43)$$

где N – объем выборки испытаний.

Находится ширина интервала вариационного ряда

$$h = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k} = \frac{R}{k}. \quad (4.44)$$

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

$$t_0 = t_{\min} - h/2. \quad (4.45)$$

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

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

В каждом интервале определяется его середина

$$\bar{t}_i = \frac{t_i + t_{i+1}}{2}. \quad (4.46)$$

Устанавливается число попаданий \bar{m}_i (опытная частота) наработок t в i -й интервал. 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 правило трех средних квадратических отклонений. В соответствии с ним результат испытаний относится к аномальному и должен быть исключен из дальнейшего анализа, если он выходит за границы допустимого разброса $\bar{t} \pm 3\sigma(t)$.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за долговечностью свечей зажигания у 80 двигателей установлены и сгруппированы по интервалам их наработки до отказа (табл. 4.1).

Значение наработки в первом интервале с частотой $\bar{m} = 1$ резко отличается от остальных экспериментальных данных. Проверим ее принадлежность к выборке.

Таблица 4.1

Параметр	Интервал								
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й
Границы интервалов, тыс. км	12 – 15	15 – 18	18 – 21	21 – 24	24 – 27	27 – 30	30 – 33	33 – 36	36 – 39
Средины интервалов \bar{t}_i , тыс. км	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5	31,5	34,5	37,5
Частота \bar{m}_i	1	–	4	16	21	17	12	7	2

Вычисляем среднее арифметическое наработки без подозреваемого результата

$$\bar{t}_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i \bar{m}_i = \frac{1}{79} (19,5 \cdot 4 + 22,5 \cdot 16 + 25,5 \cdot 21 + 28,5 \cdot 17 + 31,5 \cdot 12 + 34,5 \cdot 7 + 37,5 \cdot 2) = 27,25 \text{ тыс. км}$$

Вычисляем среднее квадратическое отклонение наработки

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \bar{t})^2 \bar{m}_i}{n-1}} = \sqrt{\frac{1484,06}{78}} = 4,37 \text{ тыс. км.}$$

Определяем границы допустимого разброса наработок до отказа относительно среднего значения \bar{t}_{cp}

$$27,25 \pm 3 \cdot 4,37 = [14,14; 40,36].$$

Следовательно, наработка, соответствующая первому интервалу, является аномальной, так как выходит за границы допустимого разброса и должна быть исключена из дальнейшего анализа.

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, по формулам (4.7), (4.8) и (4.9) определяем числовые характеристики: среднее арифметическое \bar{t}_{cp} , среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации v . В нашем примере значения среднего арифметического и среднего квадратического отклонения были определены при проверке аномальности подозреваемых результатов ($\bar{t}_{\text{cp}} = 27,25$; $\sigma = 4,37$). Они не изменились, так как рассчитывались без аномальных результатов. Значение коэффициента вариации

$$v = \sigma / \bar{t}_{\text{cp}} = 4,37 / 27,25 = 0,16.$$

Затем определяем опытную частоту \bar{m}_i , частоту $w_i = \bar{m}_i / N$ и накопленную частоту w_i^{H} . Накопленные частоты w_i^{H} вычисляются путем последовательного прибавления частоты w_i очередного интервала:

$$w_1^{\text{H}} = w_1; \quad w_2^{\text{H}} = w_1^{\text{H}} + w_2; \quad \dots; \quad w_k^{\text{H}} = \sum_{i=1}^k w_i = 1.$$

Результаты расчета сводятся в таблицу. Для рассматриваемого примера найденные значения параметров сведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Интервал	Границы интервалов, тыс. км	Середина интервала, тыс. км	Частота \bar{m}_i	Частость w_i	Накопленная частость w_i^H
1-й	18 – 21	19,5	4	0,0506	0,0506
2-й	21 – 24	22,5	16	0,2025	0,2531
3-й	24 – 27	25,5	21	0,2658	0,5189
4-й	27 – 30	28,5	17	0,2152	0,7341
5-й	30 – 33	31,5	12	0,1519	0,8860
6-й	33 – 36	34,5	7	0,0887	0,9747
7-й	36 – 39	37,5	2	0,0253	1,0

Для установления закона распределения случайной величины t результаты обработки информации, представленные в табл. 4.2, оформляют графически в виде гистограммы, которая строится следующим образом. По оси абсцисс откладывают интервалы наработок и на их основании строят прямоугольники, высота которых равна частостям w_i этих интервалов. Графическое изображение гистограммы по результатам наблюдений за свечами зажигания представлено на рис. 4.3.

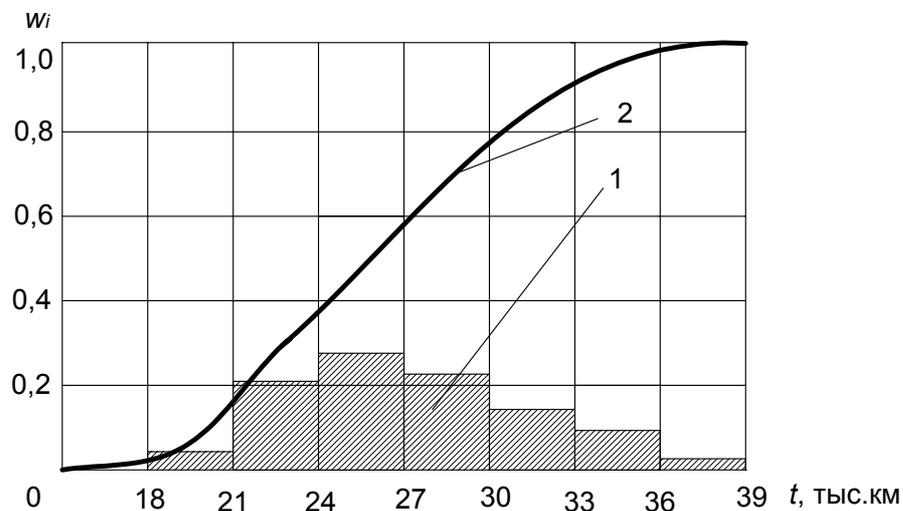


Рис. 4.3. Гистограмма распределения 1 и кумулятивная кривая 2 значений наработки свечей зажигания до отказа

Пользуясь данными табл. 4.2, по накопленным частостям w_i^H строят статистическую функцию распределения наработки t (кумулятивную кривую) $\bar{F}(t)$.

По виду гистограммы и значению коэффициента вариации v подбирают теоретический закон распределения, который наилучшим образом описывает данное статистическое распределение. Известно, что нормальному закону распределения соответствует значение коэффициента вариации $v \leq 0,3$, Вейбулла – $v > 0,3$, экспоненциальному – $v = 1,0$.

4.3.2. Проверка гипотезы о принадлежности результатов исследований выбранному закону распределения

Для проверки гипотезы о принадлежности опытных данных выбранному закону распределения существуют соответствующие критерии согласия (χ^2 Пирсона, критерий Колмогорова и др.).

Критерий χ^2 Пирсона

Этот критерий нашел широкое применение из-за легкости его использования для проверки согласия любого распределения [4]. Проверка правдоподобия гипотезы о принадлежности результатов испытаний к выбранному закону распределения записывается в виде альтернативного условия

$$\chi_{\text{опыт}}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i} = \begin{cases} \leq \chi_{\text{табл}}^2 \left(\begin{matrix} \alpha \\ S \end{matrix} \right) \\ \geq \chi_{\text{табл}}^2 \left(\begin{matrix} \alpha \\ S \end{matrix} \right) \end{cases}, \quad (4.47)$$

где \bar{m}_i, m_i – опытное и теоретическое число попаданий отказов в i -й интервал; k – количество интервалов; α – уровень значимости; S – число степеней свободы ($S = k - r - 1$); r – число параметров теоретического закона распределения.

Если $\chi_{\text{опыт}}^2 \leq \chi_{\text{табл}}^2$, гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому вероятностному закону не отвергается, в противном случае ее нельзя принять.

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 $\chi_{\text{табл}}^2$. Критические значения $\chi_{\text{табл}}^2$ в зависимо-

сти от уровня значимости α и числа степеней свободы S приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

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	6,3	3,8	2,7	1,6	11	24,7	19,6	17,2	14,6
2	9,2	5,9	4,0	3,2	12	26,2	21,0	18,5	15,8
3	11,3	7,8	6,2	4,6	13	27,6	22,3	19,8	16,9
4	13,2	9,5	7,7	5,9	14	29,1	23,6	21,0	18,1
5	15,0	11,0	9,2	7,2	15	30,5	24,9	22,3	19,3
6	16,8	12,5	10,6	8,5	16	32,0	26,2	23,5	20,4
7	18,4	14,0	12,0	9,8	17	33,4	27,5	24,7	21,6
8	20,0	15,5	13,3	11,0	18	34,8	28,8	25,9	22,7
9	21,6	16,9	14,6	12,2	19	36,1	30,1	27,2	23,9
10	23,2	18,3	15,9	13,4	20	37,5	31,4	28,4	25,0

Критерий Колмогорова

В соответствии с этим критерием определяют максимальное абсолютное отклонение D опытных значений функции распределения от теоретических (рис. 4.4)

$$D = \max |\bar{F}(t) - F(t)|. \quad (4.48)$$

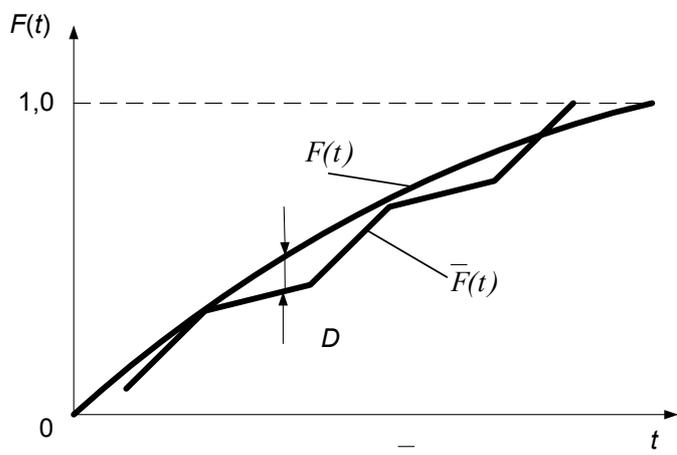


Рис. 4.4. Статистическая $\bar{F}(t)$ и теоретическая $F(t)$ функции распределения

Далее определяется величина $\lambda = D\sqrt{N}$ и по табл. 4.4 находится вероятность $P(\lambda)$. 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.

Обработка опытных данных, распределенных по экспоненциальному закону.

Последовательность обработки рассмотрим на примере.

Таблица 4.4

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

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за 35 автомобилями средней грузоподъемности были получены следующие наработки до отказа элементов системы освещения (тыс. км): 8,7; 14,0; 17,1; 72,7; 14,3; 9,9; 24,2; 26,6; 68,8; 40,1; 84,4; 17,7; 14,6; 7,1; 6,0; 22,6; 12,4; 11,6; 18,8; 27,3; 4,4; 9,2; 76,5; 13,4; 14,8; 13,8; 2,7; 46,6; 38,0; 11,0; 8,1; 42,9; 42,2; 59,4; 50,9. Требуется установить закон распределения наработок, проверить гипотезу о принадлежности опытных данных выбранному закону, построить график вероятностей безотказной работы $P(t)$ и отказа $F(t)$.

1. Определяем размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 84,4 - 2,7 = 81,7$ тыс. км; число интервалов $k = 1 + 3,32 \ln 35 = 6$; величину интервала $h = R/k = 81,7/6 = 15$ тыс. км; середины интервалов ($\bar{t}_1 = 7,5$; $\bar{t}_2 = 22,5$; $\bar{t}_3 = 37,5$; $\bar{t}_4 = 52,5$; $\bar{t}_5 = 67,5$; $\bar{t}_6 = 82,5$) тыс. км; частоты попаданий наработок в эти интервалы ($\bar{m}_1 = 16$; $\bar{m}_2 = 7$; $\bar{m}_3 = 4$; $\bar{m}_4 = 3$; $\bar{m}_5 = 3$; $\bar{m}_6 = 2$).

2. Строим гистограмму распределения частот \bar{m}_i (рис. 4.5). По виду гистограммы предполагаем, что распределение наработок до отказа подчиняется экспоненциальному распределению.

3. Определяем среднее значение наработки до отказа

$$\bar{t}_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k t_i \bar{m}_i = \frac{1}{35} (16 \cdot 7,5 + 7 \cdot 22,5 + \dots + 2 \cdot 82,5) = 27,2 \text{ тыс. км.}$$

4. Определяем интенсивность отказов

$$\lambda = 1/\bar{t}_{\text{cp}} = 1/27,2 = 0,0368 \text{ тыс. км}^{-1}.$$

5. Находим вероятности попаданий наработок t в каждый из интервалов (вероятность усеченного распределения)

$$p_{iy} = P(t_i < \bar{t}_i < t_{i+1}) = e^{-\lambda t_i} - e^{-\lambda t_{i+1}}.$$

Для первого интервала

$$p_{1y} = (0 < t_1 < 15) = e^{-0,0368 \cdot 0} - e^{-0,0368 \cdot 15} = 1 - 0,595 = 0,405.$$

Аналогично вычисляем вероятности попадания t в остальные интервалы:

$$p_{2y} = 0,262; \quad p_{3y} = 0,143; \quad p_{4y} = 0,079; \quad p_{5y} = 0,048; \quad p_{6y} = 0,025.$$

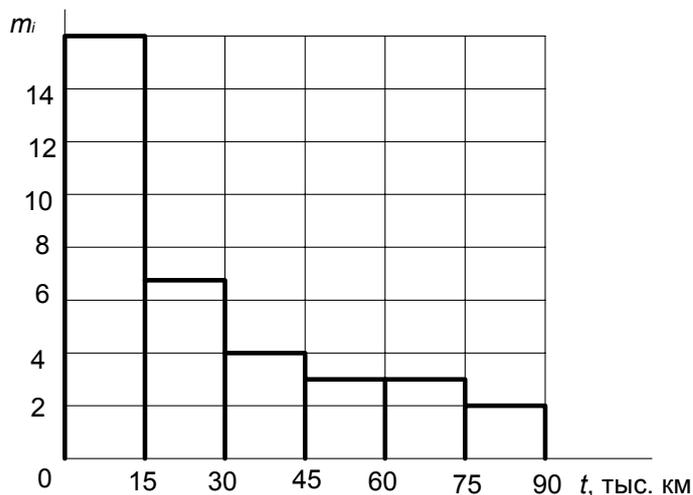


Рис. 4.5. Гистограмма распределения наработок элементов системы освещения до отказа

6. Определяем нормирующий множитель

$$C = 1 / \sum_{i=1}^6 p_i = 1 / 0,962 = 1,04.$$

7. Вычисляем исправленные вероятности

$$p_i = p_{iy} C$$

$$p_1 = p_{1y} \cdot 1,04 = 0,421;$$

$$p_2 = 0,279; \quad p_3 = 0,149;$$

$$p_4 = 0,082; \quad p_5 = 0,050;$$

$$p_6 = 0,026.$$

8. Определяем теоретические частоты $m_i = p_i N$.

Для первого интервала $m_1 = 0,421 \cdot 35 = 14,735$. Для последующих интервалов: $m_2 = 9,765$; $m_3 = 5,215$; $m_4 = 2,870$; $m_5 = 1,75$; $m_6 = 0,91$.

9. Находим значение критерия согласия χ^2 Пирсона по формуле (4.47). Для удобства все расчеты сводим в табл. 4.5.

Таблица 4.5

i	\bar{m}_i	m_i	$\bar{m}_i - m_i$	$(\bar{m}_i - m_i)^2$	$\frac{(\bar{m}_i - m_i)^2}{m_i}$
1	16	14,735	1,265	1,600	0,111
2	7	9,77	-2,77	7,67	0,7850
3	4	5,21	-1,21	1,46	0,2802
4	3	2,87	0,13	0,02	0,0070
5	3	1,75	1,25	1,56	0,8914
6	2	0,91	1,09	1,19	1,3077
Σ	35				$\chi_{\text{опыт.}}^2 = 3,38$

По табл. 4.3 значений критерия Пирсона при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $S = k - r - 1 = 6 - 1 - 1 = 4$ находим $\chi_{\text{табл.}}^2 = 9,5$. Так как $\chi_{\text{опыт.}}^2 < \chi_{\text{табл.}}^2$, гипотеза о распределении наработок элементов системы освещения по экспоненциальному закону не отвергается.

10. По найденным значениям исправленной вероятности p_i определяем величины интегральных функций распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t) = 1 - F(t)$ по интервалам наработки:

$$F(t_1) = p_1 = 0,421; F(t_2) = p_1 + p_2 = 0,421 + 0,279 = 0,700 \text{ и т.д.}$$

$P(t_1) = 1 - F(t_1) = 1 - 0,421 = 0,579$. Для остальных интервалов рассчитанные значения $F(t)$ и $P(t)$ представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Функция	Интервал					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
$F(t_i)$	0,421	0,700	0,849	0,931	0,981	1,000
$P(t_i)$	0,579	0,300	0,151	0,069	0,019	0

Используя найденные значения $F(t)$ и $P(t)$, строим график (рис. 4.6).

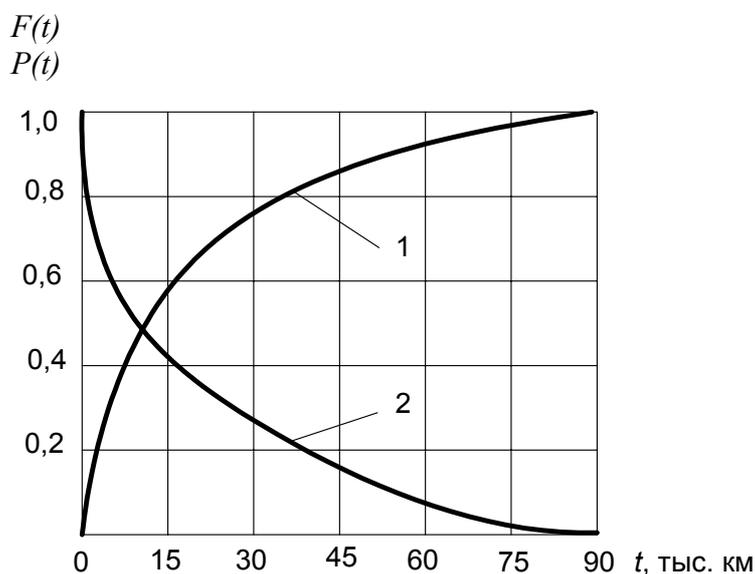


Рис. 4.6. График интегральной функции распределения отказов (1) и вероятности безотказной работы (2) при наработке t

Обработка опытных данных, распределенных по нормальному закону

Обработку и проверку гипотезы о принадлежности опытных данных нормальному распределению рассмотрим на примере.

Пример. По результатам эксплуатационных наблюдений за 47 двигателями ЗМЗ-4063.10 были установлены следующие наработки до отказа вкладышей коренных шеек коленчатого вала (тыс. км): 90; 95; 120; 115; 112; 122; 105; 116; 108; 129; 130; 145; 128; 142; 144; 148; 140; 139; 156; 170; 162; 174; 168; 171; 173; 168; 155; 169; 170; 191; 180; 186; 198; 190; 194; 179; 178; 204; 211; 203; 217; 221; 228; 231; 236; 250; 232.

Требуется установить закон распределения, проверить гипотезу о принадлежности статистических данных выбранному закону, определить основные параметры распределения отказов по наработке.

1. Последовательно определяем:

- размах выборки $R = t_{\max} - t_{\min} = 250 - 90 = 160$ тыс. км;
- число интервалов $k = 1 + 3,32 \ln 47 = 7$;
- интервал $h = R/k = 160/7 = 22,9$ тыс. км (принимаем $h = 25$ тыс. км);
- частоты попаданий наработок в эти интервалы ($\bar{m}_1 = 2$; $\bar{m}_2 = 7$; $\bar{m}_3 = 9$; $\bar{m}_4 = 11$; $\bar{m}_5 = 8$; $\bar{m}_6 = \bar{m}_7 = 5$);
- середины интервалов ($\bar{t}_1 = 87,5$; $\bar{t}_2 = 112,5$; $\bar{t}_3 = 137,5$; $\bar{t}_4 = 162,5$; $\bar{t}_5 = 187,5$; $\bar{t}_6 = 212,5$; $\bar{t}_7 = 237,5$).

2. Используя формулы (4.7), (4.8) и (4.9), вычисляем числовые характеристики выборки:

$$\bar{t}_{\text{ср.}} = \frac{1}{47} (87,5 \cdot 2 + 112,5 \cdot 7 + \dots + 237,5 \cdot 5) = 166 \text{ тыс. км};$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{(87,5 - 166)^2 \cdot 2 + \dots + (237,5 - 166)^2 \cdot 5}{47 - 1}} = 40,6 \text{ тыс. км};$$

$$v = 40,6/166 = 0,24.$$

3. Строим гистограмму распределения частоты отказов вкладышей по наработке t (рис. 4.7).

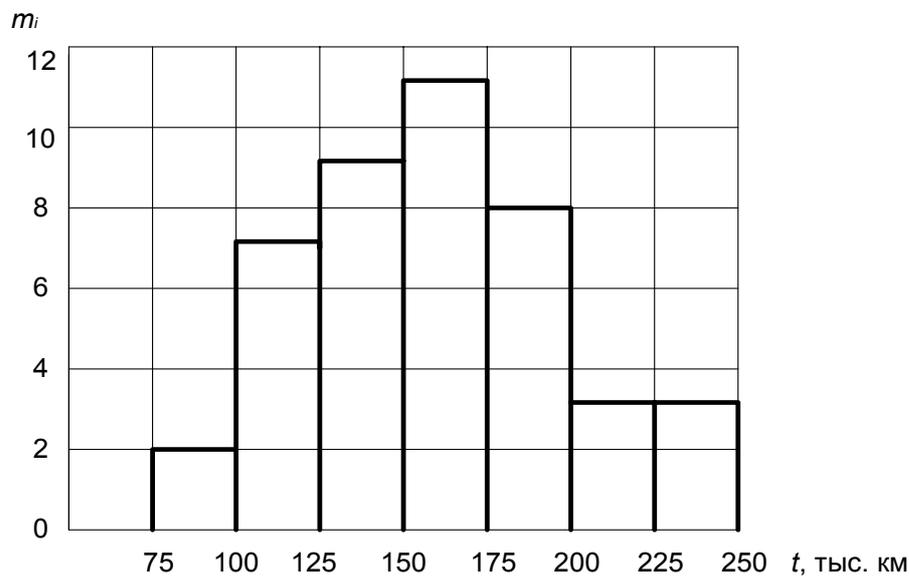


Рис. 4.7. Гистограмма распределения отказов вкладышей коренных шеек коленчатого вала по наработке t

По виду гистограммы и значению коэффициента вариации $v = 0,24$ предполагаем, что распределение отказов вкладышей подчиняется нормальному закону.

4. Для удобства вычислений пронормируем величину t , т.е. перейдем к новой случайной величине $z = \frac{t - \bar{t}_{cp}}{\sigma(t)}$ и вычислим границы новых интервалов:

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

Расчеты сводим в табл. 4.7, полагая при этом, что левая граница первого интервала равна $-\infty$, а правая последнего интервала ∞ .

Таблица 4.7

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

5. Вычисляем 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. С этой целью составим расчетную табл. 4.8.

Таблица 4.8

i	Границы интервала		$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	Теоретические частоты $m_i = Np_i$
	z_i	z_{i+1}				
1	$-\infty$	–1,63	–0,5000	–0,4484	0,0516	2,43
2	–1,63	–1,01	–0,4484	–0,3438	0,1046	4,92
2	–1,01	–0,40	–0,3438	–0,1554	0,1884	8,85
4	–0,40	0,22	–0,1554	0,0871	0,2425	11,40
5	0,22	0,84	0,0871	0,2995	0,2124	9,98
6	0,84	1,46	0,2995	0,4279	0,1284	6,03
7	1,46	∞	0,4279	0,5000	0,0721	3,38

6. Рассчитываем значение критерия согласия χ^2 Пирсона (расчеты сводим в табл. 4.9).

Таблица 4.9

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

По табл. 4.3 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $s = k - r - 1 = 7 - 2 - 1 = 4$ находим $\chi^2_{\text{табл.}} = 9,5$. Так как $\chi^2_{\text{опыт.}} < \chi^2_{\text{табл.}}$ гипотеза о принадлежности выборочных данных к нормальному закону распределения принимается.

7. Используя выражение (4.22), определяем вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $F(t)$ вкладышей на наработках, соответствующих серединам интервалов выборки \bar{t}_i . Для первого из них

$$P(t = 87,5) = 0,5 - \Phi\left(\frac{87,5 - 166}{40,6}\right) = 0,5 - \Phi(-1,933) = 0,9742.$$

$$F(t = 87,5) = 1 - P(t = 87,5) = 1 - 0,9742 = 0,0258.$$

Результаты расчета для остальных интервалов сводим в табл. 4.10.

Таблица 4.10

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
$f(t_i), 10^{-3}$	0,0015	0,0041	0,0077	0,0098	0,0085	0,0051	0,0021
$\lambda(t_i), 10^{-3}$	0,0016	0,0045	0,010	0,0195	0,0285	0,0405	0,0531

По найденным значениям $P(t)$ и $F(t)$ строим график (рис. 4.8).

Плотность распределения $f(t)$ вычисляем по формуле (4.21) и табличным значениям для $f_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$. Для первого интервала выборки

$$f(t=87,5) = \frac{1}{40,6} f_0\left(\frac{87,5-166}{40,6}\right) = 0,0246 \cdot 0,0620 = 0,001525 \cdot 10^{-3}.$$

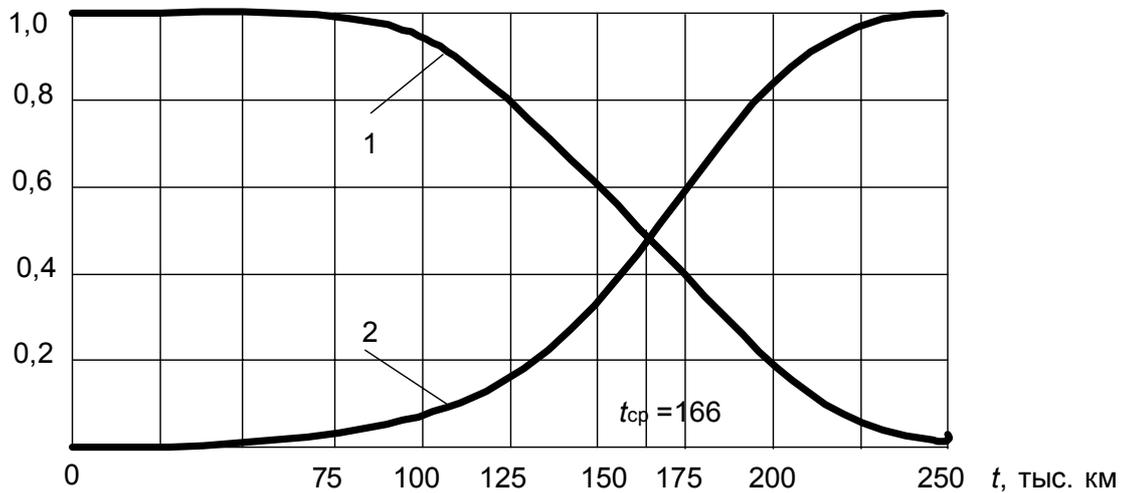


Рис. 4.8. График функций вероятности безотказной работы (1) и вероятности отказов (2)

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ на этой наработке

$$\lambda(t=87,5) = f(t=87,5)/P(t=87,5) = 0,001525 \cdot 10^{-3} / 0,9742 = 0,00156 \cdot 10^{-3}.$$

Для остальных интервалов наработки расчетные значения $f(t)$ и $\lambda(t)$ приведены в табл. 4.10. Графическое изображение характеристик $f(t)$ и $\lambda(t)$ представлено на рис. 4.9.

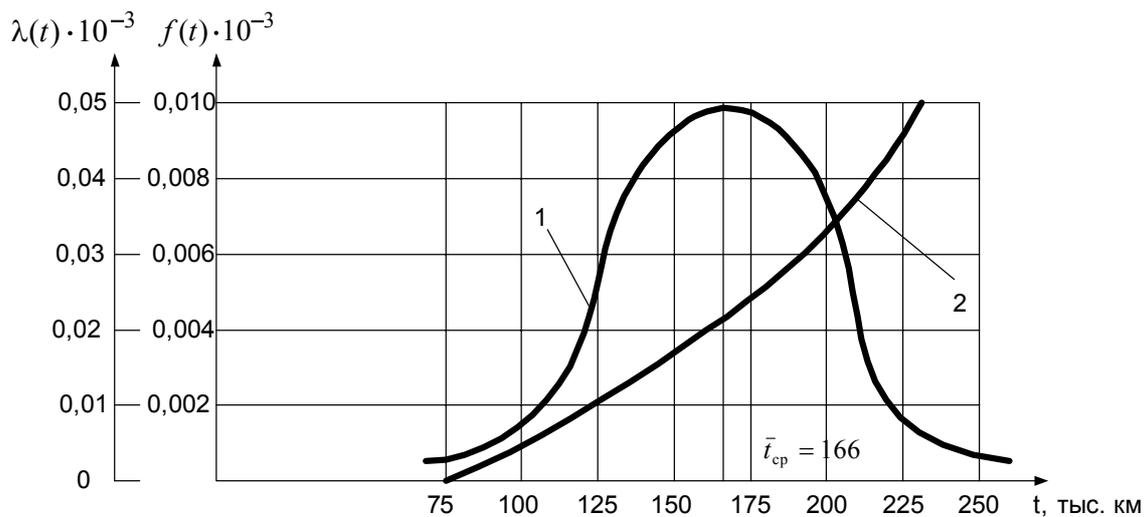


Рис. 4.9. График плотности распределения (1) и интенсивности отказов (2) вкладышей шеек коренных подшипников

Обработка опытных данных, распределенных по закону Вейбулла

Пример. По результатам эксплуатационных испытаний 50 автомобилей средней грузоподъемности установлены и сгруппированы по интервалам наработки до предельного состояния ведомых дисков сцепления (табл. 4.11). Определение значений $R, k, h, \bar{t}_i, \bar{m}_i$ осуществлялось по той же методике, что и для других законов распределения.

Таблица 4.11

Показатель	Интервал						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
Границы интервала, тыс. км	15 – 30	30 – 45	45 – 60	60 – 75	75 – 90	90 – 105	105 – 120
Середина интервала, тыс. км	22,5	37,5	52,5	67,5	82,5	97,5	112,5
Частота попаданий \bar{m}_i	6	14	12	9	6	2	1

1. Определяем числовые характеристики выборки:

$$\bar{t}_{\text{cp}} = \frac{1}{50} (22,5 \cdot 6 + 37,5 \cdot 14 + \dots + 112,5 \cdot 1) = 54 \text{ тыс. км};$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{(22,5 - 54)^2 \cdot 6 + (37,5 - 54)^2 \cdot 14 + \dots + (112,5 - 54)^2}{49}} = 22,4 \text{ тыс. км};$$

$$v = 22,4/54 = 0,41.$$

2. Строим гистограмму распределения частоты отказов (рис. 4.10).

По виду гистограммы и коэффициенту корреляции $v = 0,41$ предполагаем, что отказы ведомых дисков согласуются с законом Вейбулла.

3. По таблицам значений параметров распределения Вейбулла для коэффициента вариации $v = 0,41$ находим [8]:

$$b = 2,7; k_B = 0,890; q_B = 0,350.$$

4. Из выражения (4.33) определяем второй параметр распределения (параметр масштаба a)

$$a = \bar{t}_{\text{cp}} / k_B = 54 / 0,890 = 60,7 \text{ тыс. км}.$$

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

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

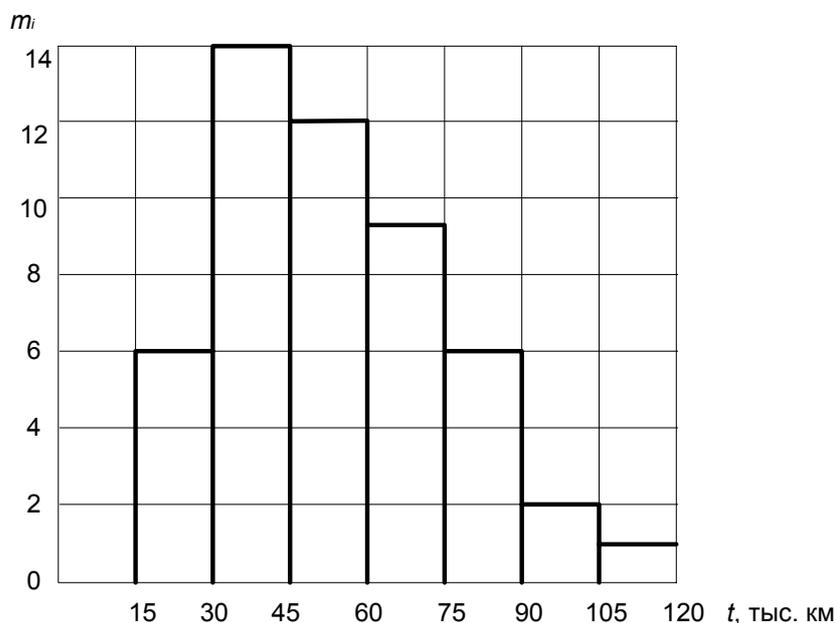


Рис. 4.10. Гистограмма распределения частоты отказов ведомых дисков сцепления автомобилей средней грузоподъемности

Для первого интервала

$$p(t_1) = e^{-\left(\frac{15}{60,7}\right)^{2,7}} - e^{-\left(\frac{30}{60,7}\right)^{2,7}} = e^{-0,0237} - e^{-0,1539} = 0,12.$$

Для остальных интервалов найденные значения $p(t_i)$ сводим в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Характеристики	Интервал						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
1. Теоретическая вероятность $p(t_i)$	0,12	0,224	0,263	0,210	0,110	0,038	0,035
2. Теоретическая частота m_i	6	11,2	13,15	10,5	5,5	1,9	1,82
3. Интегральная функция $F(t_i)$	0,12	0,344	0,607	0,817	0,927	0,965	1,00
4. Вероятность безотказной работы $P(t_i)$	0,88	0,656	0,393	0,183	0,073	0,035	0
5. Интенсивность отказов $\lambda(t_i)$	0,0083	0,0200	0,0348	0,0537	0,0759	0,1011	0,1281
6. Плотность распределения $f(t_i)$	0,0073	0,0131	0,01367	0,0098	0,0055	0,0035	0

6. Вычисляем теоретические частоты попадания отказов в интервалы наработки:

$$m_1 = p(t_1)N = 0,12 \cdot 50 = 6;$$

$$m_2 = p(t_2)N = 0,224 \cdot 50 = 11,2 \text{ и т.д.}$$

Для остальных интервалов расчетные значения m_i приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

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

8. По табл. 4.3 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $S = 4$ находим $\chi_{\text{табл.}}^2 = 9,5$. Гипотеза о принадлежности опытных данных закону Вейбулла не отвергается, так как $\chi_{\text{опыт.}}^2 < \chi_{\text{табл.}}^2$.

9. Для построения кривых вероятностей отказа $F(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t)$ воспользуемся формулами:

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

Результаты расчета сведены в табл. 4.12 и изображены графически на рис. 4.11.

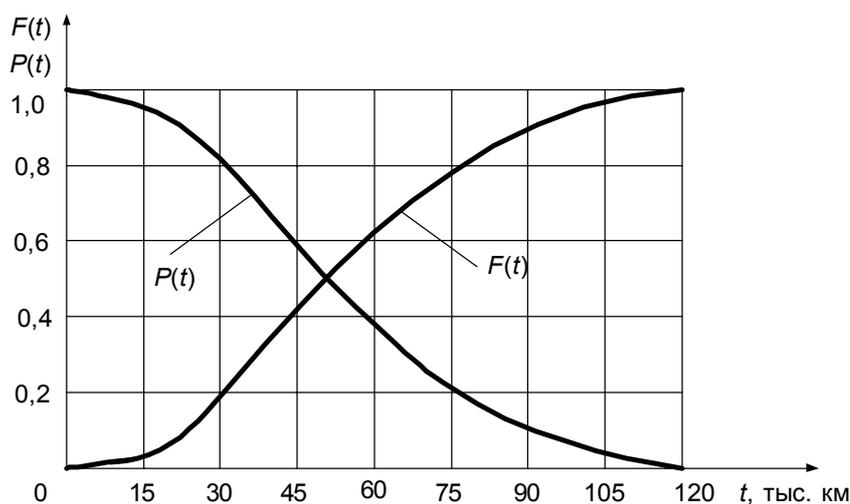


Рис. 4.11. График вероятностей отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$ ведомых дисков сцепления

10. Используя формулу (4.40), рассчитываем интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность вероятностей распределения $f(t)$ по интервалам наработки t_i . Для первого интервала

$$\lambda(t_1 = 22,5) = \frac{2,7}{60,7} \left(\frac{22,5}{60,7} \right)^{2,7-1} = 0,045 \cdot 0,37^{1,7} = 0,0083;$$

$$f(t_1) = P(t_1) \lambda(t_1) = 0,88 \cdot 0,0083 = 0,0073.$$

Аналогично рассчитываем $\lambda(t)$ и $f(t)$ для остальных интервалов и результаты сводим в табл. 4.12. Графическое изображение кривых $\lambda(t)$ и $f(t)$ представлено на рис. 4.12.

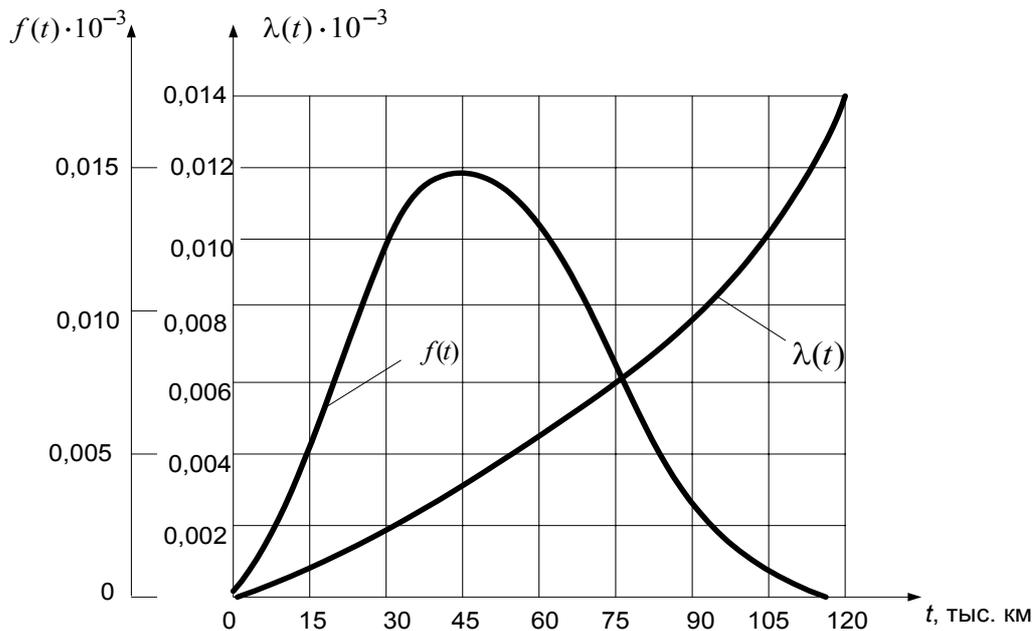


Рис. 4.12. График плотности распределения $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ ведомых дисков сцепления

4.4. Обработка информации по надежности при незавершенных испытаниях

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

При эксплуатационных испытаниях автомобилей наиболее типичными являются случаи, когда к моменту прекращения испытаний в выборке имеются работоспособные изделия, наработка которых до предельного состояния не установлена из-за прекращения испытаний. Например, при испытании 30 автомобилей на наработке 150 тыс. км отказало 25 исследуемых элементов. Нарботки остальных пяти неизвестны, так как испытания этих автомобилей были приостановлены по различным причинам, а исследуемые элементы не достигли своего предельного состояния. В этом случае оценка показателей надёжности только по 25 отказавшим элементам была бы необъективной, так как не учтены потенциальные ресурсы пяти оставшихся элементов, испытания по которым были приостановлены.

При незавершенных испытаниях обработка информации осуществляется на основе прогнозирования отказов с учётом наработок оставшихся работоспособных элементов к моменту приостановки испытаний. Для автомобильной техники методика такой обработки изложена в РТМ 37.001.006. Обработка результатов испытаний в этом случае отличается от обработки результатов завершённых испытаний особенностями построения статистического ряда распределения. Эти особенности заключаются в следующем.

Нарботка изделий за время испытаний разбивается на интервалы. Составляется таблица распределения наработок отказавших и не отказавших из-за приостановки испытаний изделий по интервалам группировки. Вероятность отказа к концу интервала с учётом не отказавших изделий определяется по формуле

$$F(t) = \frac{m_i}{N+1}, \quad (4.49)$$

где N – общее количество изделий в выборке; m_i – прогнозируемое количество отказов к концу i -го интервала с учётом не отказавших из-за приостановки испытаний изделий.

Прогнозируемое количество отказов m_i определяется из выражения

$$m_i = m_{(i-1)} + k_i n_i, \quad (4.50)$$

где $m_{(i-1)}$ – прогнозируемое число отказов в интервале $(i-1)$; n_i – количество отказавших изделий в i -м интервале; k_i – коэффициент приращения отказов в i -м интервале:

$$k_i = \frac{N+1 - m_{(i-1)}}{N+1 - \sum g_i - \sum n_{(i-1)}}, \quad (4.51)$$

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

Для первого интервала

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

Для второго интервала

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

Рассмотрим изложенный метод расчёта на конкретном примере.

Пример. При проведении эксплуатационных испытаний на долговечность тормозных накладок передних колёс 40 автомобилей средней грузоподъёмности были получены и сгруппированы по интервалам наработки до предельного состояния (табл. 4.14). Из выборки 10 автомобилей были сняты с испытаний по разным, не относящимся к испытываемым деталям, причинам. Требуется определить показатели надёжности тормозных накладок с учётом снятых с испытания автомобилей.

По формулам (4.49), (4.50), (4.51) рассчитываем величины $F(t_i)$, m_i , k_i .

Таблица 4.14

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

Для первого интервала

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

Для второго интервала

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

Для третьего интервала

$$k_3 = \frac{40 + 1 - 5,104}{40 + 1 - 3 - 5} = 1,121; m_3 = 5,104 + 1,088 \cdot 11 = 17,072;$$

$$F(t_3) = \frac{17,072}{41} = 0,425.$$

Таким же образом рассчитываем k_i , m_i , $F(t_i)$ для остальных интервалов наработки и результаты сведём в таблицу 4.14. После того как определено прогнозируемое количество отказов m_i по интервалам наработки, дальнейшая обработка информации проводится так же, как и при завершённых испытаниях.

Контрольные вопросы

1. Как определяется объём представительной выборки обследования?
2. Назовите основные числовые характеристики распределения случайной величины наработки.
3. Объясните физический смысл обобщённых зависимостей $P(t)$, $F(t)$ и $f(t)$.
4. Как осуществляется сбор и обработка информации о надёжности автомобилей в условиях эксплуатации?
5. С помощью каких критериев согласия проверяются гипотезы о принадлежности опытных данных выбранному закону распределения?
6. Какие основные законы распределения используют для обработки информации о надёжности автотранспортных средств?
7. Приведите порядок обработки информации об отказах, описываемых экспоненциальным, нормальным, логарифмически нормальным законами и распределением Вейбулла.
8. Постройте графики интегральной функции распределения отказов $F(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t)$ для вышеназванных законов.
9. Как изменяются по наработке плотность распределения $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ для экспоненциального и нормального распределений?
10. Как определяются показатели надёжности при незавершённых испытаниях?
11. Приведите примеры отказов, описываемых вышеперечисленными законами.

Глава 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Одной из главных задач инженерно-технической деятельности при разработке и проектировании продукции машиностроения является создание конкурентоспособных машин. При этом среди многих факторов, определяющих качество и соответственно конкурентоспособность машин, особое место следует отвести их надежности.

Приоритетное место надежности машин при проектировании и изготовлении подтверждается статистическими данными, свидетельствующими о том, что расходы на поддержание их в работоспособном состоянии непрерывно растут. Суммарные ежегодные затраты только на капитальные ремонты технических средств составляют 25 – 30 млрд руб. Около 30 – 35 % металлорежущих станков занято изготовлением запасных частей, 20 – 25 % выплавляемого металла расходуется на эти же цели. Численность рабочих, ремонтирующих и обслуживающих автомобили, в 4 – 5 раз превышает число рабочих, занятых на производстве новых автомобилей. Трудозатраты на ремонт двигателя внутреннего сгорания за срок его службы в 8 – 12 раз больше, чем на изготовление нового.

Надежность на этапах разработки и производства машин должна рассматриваться как один из важнейших факторов, определяющих их качество и конкурентоспособность. Разработка машин включает в себя несколько этапов: проектирование; конструирование; изготовление опытного образца, его испытание и доводку; постановку на серийное производство; серийное производство.

Проектирование – это процесс разработки машин на уровне чертежей, который включает в себя несколько стадий (рис. 5.1).

Процесс проектирования на всех стадиях сводится к графическому (чертежному), текстовому и математическому описанию еще не существующей машины на основе первичного представления о её функционировании. Итоговым результатом процесса проектирования является технический проект, содержащий чертежную и текстовую информацию, необходимую для выпуска конструкторской документации.

Конструирование машин включает разработку вариантов конструкций деталей и узлов (сборочных единиц), расчеты их кинематики и динамики, надежности и экономических показателей, а также тепловые и прочностные расчеты.

В связи со значительной сложностью современных машин перед постановкой их на производство изготавливают и подвергают всевозможным испытаниям опытный образец. По результатам испытаний и доводки опытного образца устанавливают технические и эксплуатационные характеристики машины.

Постановка машин на производство предусматривает технологическую, материально-техническую и организационную подготовку производства для их серийного выпуска. Вначале изготавливают и испытывают установочную партию машин. По результатам испытаний конструкторскую документацию корректируют.



Рис. 5.1. Структура процесса проектирования машины

Усилия всех участников сложного процесса разработки, освоения и производства машин должны быть направлены на обеспечение их высокого качества за счет, главным образом, достижения наивысшего уровня надежности.

5.1. Конструктивные методы обеспечения надежности машин

Повышение надежности машин при конструировании направлено, главным образом, на увеличение их сопротивляемости внешним воздействиям и включает ряд мероприятий, выполнение которых способствует решению поставленной задачи.

Оптимизация компоновочного решения машины

Одно из важнейших условий обеспечения высокой надежности машин при их разработке – обоснованный выбор структуры машины и состава её основных частей. Этот этап проектно-конструкторских работ называется компоновкой машины, принципы которой показаны на рис. 5.2.

Принцип минимизации структурных единиц и элементов конструкции предусматривает сокращение до оптимального уровня числа структурных единиц и элементов конструкции машины при её компоновке без ущерба выполнения ею заданных функций. С увеличением количества элементов в машине существенно снижаются её показатели безотказности.



Рис. 5.2. Принципы компоновки машины для обеспечения её высокой надежности

Принцип ограниченности «новых» событий предусматривает ограничение принципиально новых, не проверенных практикой элементов конструкций и структурных единиц. Применение нового элемента в составе машины может быть оправдано лишь тогда, когда без этого элемента не могут быть обеспечены заданные функциональные параметры, и при условии проведения всестороннего расчетно-экспериментального анализа надежности данного элемента.

Принцип модульности означает, что техническое устройство должно быть составлено из экономически обоснованного минимального числа однотипных элементов, получивших название модулей. Модуль – конструктивно и технологически завершенная структурная единица машины, обос-

нованно выбранная из множества возможных вариантов структурных единиц одинакового функционального назначения. Модуль машины может иметь различную структурную сложность: от сборочной единицы до механизма, сопряжения и отдельной детали.

Модульная компоновка нашла широкое распространение в автомобилестроении. При разработке, например легкового автомобиля, маркетологи фирмы формируют образ машины, которая будет востребована через несколько лет. Затем конструкторы создают контуры будущего автомобиля и начинают его компоновку. Прорабатывается чертеж с основными размерами автомобиля и расположением пассажиров в салоне, подбираются платформа и основные модули агрегатов, узлов, систем. Основная задача компоновки – оптимальным образом разместить все агрегаты и системы внутри кузова.

Современные компьютерные программы с обширными базами данных позволяют не только выполнить различные варианты компоновок и представить на экране их трехмерное изображение, но и произвести в кратчайшие сроки все необходимые конструкторские расчеты, в том числе на долговечность и безотказность.

Принцип диагностирующей защиты означает возможность постоянного или регламентного определения технического состояния машины в процессе эксплуатации. Соблюдение этого принципа при компоновке машины является необходимым условием обеспечения высокого уровня их эксплуатационной надежности.

Принцип расчетной и модульной защиты предусматривает обязательную графическую и расчетную проверку машины при её проектировании. По чертежам отдельных деталей в масштабе 1:1 вычерчивают сборочные чертежи узлов и машины в целом и затем из различных материалов изготавливают модель машины. Это исключает возможность масштабных, габаритных и эстетических ошибок при производстве машины.

Расчетная защита на этапе проектирования заключается в необходимости выполнения проектных расчетов всех элементов конструкции на прочность до передачи машины в производство.

Выполнение перечисленных принципов компоновки автомобилей обеспечивает высокий уровень её эксплуатационной надежности. Однако современные требования к активной, пассивной и экологической безопасности, снижению удельного расхода топлива, удобству управления и комфорту, а также все большее насыщение автомобилей электроникой всту-

пают, как правило, в противоречие с принципами их компоновки, поэтому конструкторы вынуждены постоянно искать компромиссные решения.

Рациональный выбор материалов для узлов трения

При выборе материалов для пар трения к ним предъявляется ряд требований, к которым прежде всего относятся:

- легкая прирабатываемость;
- высокая износостойкость при нормальных условиях работы;
- низкий коэффициент трения;
- отсутствие молекулярного схватывания в условиях несовершенной смазки.

К материалам деталей, подвергающихся при эксплуатации воздействию циклических и динамических нагрузок, наряду с перечисленными дополнительно предъявляются требования высокой *усталостной прочности и ударной вязкости*. Материалы таких деталей, как шестерни, подшипники, кулачковые валы, крестовины карданных валов и дифференциалов должны отвечать дополнительно требованию высокой контактной усталостной прочности.

Стремление максимально повысить износостойкость материалов деталей в узлах трения привело к появлению разнообразных антифрикционных материалов (рис. 5.3). При разработке конструкции узла трения должен быть обеспечен их рациональный выбор.

Стали являются наиболее распространенным материалом в узлах трения, так как большинство деталей машин до настоящего времени изготавливается из сталей.

Для повышения износостойкости поверхности деталей из углеродистых сталей упрочняют (цементирование, азотирование, закалка, лазерная обработка).

Аустенитно-ферритные стали обладают более высокой твердостью, а следовательно, и износостойкостью по сравнению с аустенитами.

Высоколегированные стали предназначены для узлов трения, работающих в средах с высокой агрессивностью. Наибольшее распространение получили сплавы на основе никель – молибден, никель – хром, никель – хром – молибден.

Следует иметь в виду, что сопряжения сталь по стали имеют низкие антифрикционные свойства и соответственно низкую износостойкость. Поэтому сталь в узлах трения используют в сочетании с подшипниками

скольжения, выполняемыми из чугуна, цветных металлов, пластмасс, керамических и других композитных материалов.

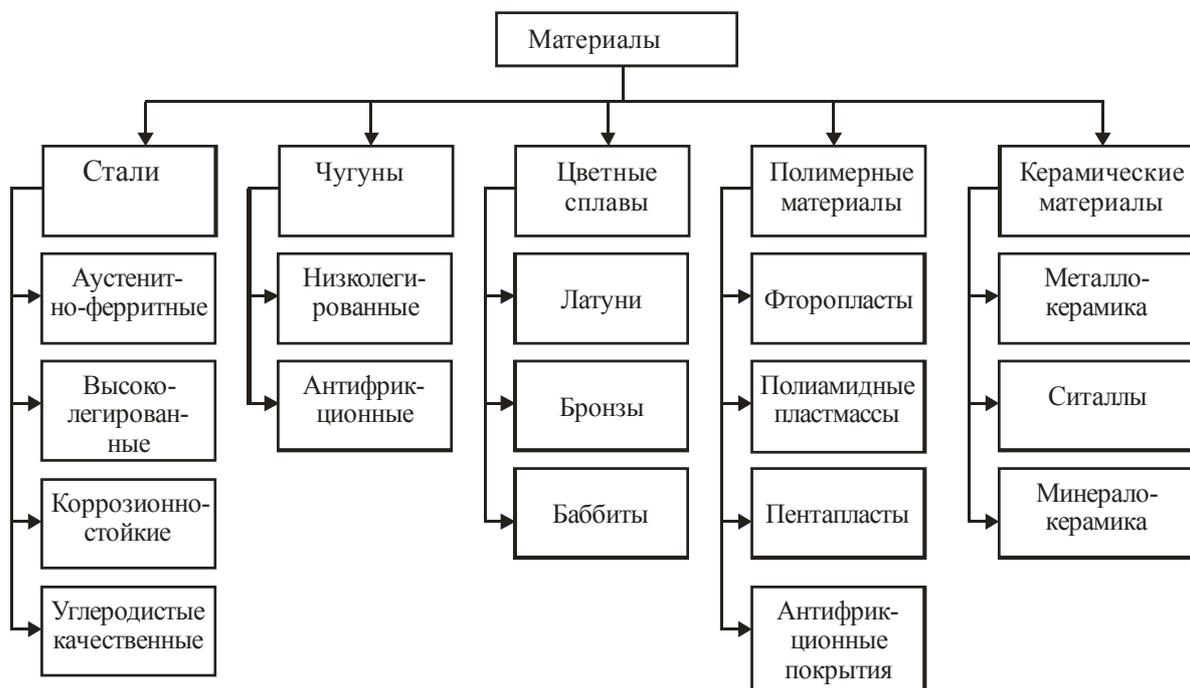


Рис. 5.3. Антифрикционные материалы, используемые в узлах трения

Антифрикционные свойства *чугунов* обусловлены наличием в их структуре свободного графита, который за счет пористости способствует проникновению смазки в поверхностные слои материала и её удержанию.

Цветные металлы являются наиболее распространенными материалами для изготовления подшипников скольжения. Высокие антифрикционные свойства цветных металлов на основе меди (латуни и бронзы) обуславливаются избирательным переносом меди из твердого расплава в сталь и обратно, что обеспечивает снижение коэффициента трения.

Из цветных сплавов наибольшее применение получили баббиты (оловянные и свинцовые).

Полимерные материалы прочно прописались в современных автомобилях, вытесняя сталь, чугун и цветные металлы из двигателя, шасси и кузова. Механические свойства полимерных материалов обеспечиваются за счет использования в качестве наполнителя тканей, стекло- и углеволокна, специальных порошков и т.д.

Изготовленные американской фирмой «*Polimotor Research*» опытные двигатели из композитных полимеров на основе стекло-углеволокна фенольной смолы существенно легче (табл. 5.1) и технологичнее при производстве.

Фенольная смола, усиленная стекловолокном, обладает высокой прочностью и жесткостью. При уменьшении веса двигателя на 50 % существенно снижаются вибрации, что позволяет увеличить его срок службы примерно вдвое.

Таблица 5.1

Деталь	Композитный материал, г	Сталь, г	Алюминиевый сплав, г
Блок цилиндров	14000	41000	23000
Головка блока	10000	25000	17000
Поршень	250	–	500
Поршневой палец	50	140	–
Шатун	400	800	550
Толкатель	25	75	–
Клапанное коромысло	150	400	300
Впускной клапан	20	100	–
Колпак клапанного механизма	230	1800	900
Распределительная шестерня	340	900	450
Маховое колесо	900	3600	1800
Корпус водяного насоса	300	1400	450
Поддон картера	400	2700	1400

Керамические материалы применяют в узлах трения без смазки при высоких температурах и агрессивных средах.

В автомобилестроении все большее распространение получают металлокерамические материалы, представляющие собой композиты на основе окислов алюминия, кремния и магния (поршни, клапаны, накладки дисков сцепления, тормозные диски и др.). Изготовленные, например, из керамических волокон с наполнителем из алюминиевого сплава поршни отличаются высокой износостойкостью.

Оптимизация геометрической формы деталей узлов трения

Реальный процесс изнашивания, подчиняясь определенным закономерностям, приводит к минимизации его интенсивности за счет образования оптимальной шероховатости, структуры поверхности и её геометрической формы в переходный период. В связи с этим наряду с факторами, учитывающими износостойкость материалов элементов узла трения, для повышения его надежности необходима оптимизация геометрии сопряженных элементов конструкции.

Продолжительность переходного периода (рис. 5.4) оказывает существенное влияние на ресурс узла трения. В связи с этим оптимизация геометрической формы элементов конструкции узла трения физически связа-

на с минимизацией продолжительности переходного периода $t_{пр}$. Это положение обусловлено тем, что геометрические формы элементов конструкции, как правило, не совпадают с оптимальными, присущими процессу нормального изнашивания, когда его интенсивность минимальна.

Таким образом, наряду с оптимизацией шероховатости и повышением точности обработки сопряженных поверхностей необходимо придание поверхностям кинематической пары формы, соответствующей нормальному изнашиванию уже в процессе изготовления элементов конструкции. Из рис. 5.4 видно, что после модернизации геометрической формы элементов в узле трения продолжительность переходного периода $t_{пр}$ снизилась, а ресурс T_p существенно увеличился.

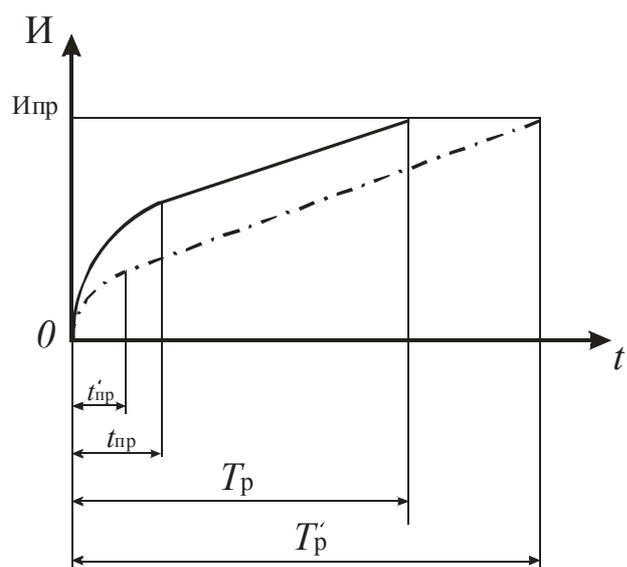


Рис. 5.4. Схема процесса изнашивания: $t_{пр}$, $t'_{пр}$ – продолжительность переходного периода до и после модернизации геометрической формы; T_p , T'_p – ресурсы до и после модернизации геометрической формы

Изменением формы коленчатых валов, клапанов, поршней, блока цилиндров и других деталей существенно повышается ресурс двигателей. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) с их широкими функциональными возможностями позволяют существенно ускорить процесс оптимизации геометрических форм элементов самых различных агрегатов и узлов автомобиля.

Обеспечение нормальных условий работы

Для обеспечения нормальной работы деталей необходимо прежде всего определить рациональные размеры контактирующих поверхностей, их геометрическую форму, рассчитать действующие нагрузки и другие параметры сопряжений, обеспечивающие *наименьшие потери на трение*.

Поверхности подшипников скольжения рассчитывают, например, на удельные нагрузки; поверхности шлицев и опор валов – на смятие; фрикционные пары – на нагрев; рессоры – на усталостную прочность и т.д.

Для обеспечения минимальных потерь на трение при конструировании стремятся вместо подшипников скольжения, если позволяют условия, применять подшипники качения. Это значительно повышает надежность узла, снижает пусковые моменты, уменьшает расход цветных металлов, упрощает обслуживание. Вместе с тем следует учитывать, что подшипники качения выдерживают меньшие скорости и нагрузки, снижается их сопротивляемость вибрациям.

В этом отношении более надежными являются конические двухрядные роликовые подшипники, которые, например, начинают вытеснять шарикоподшипники в ступицах колес легковых автомобилей. Такие подшипники более надежны, так как у роликов увеличена площадь соприкосновения с кольцом и возникающие при эксплуатации нагрузки распределяются значительно равномернее. Как показали стендовые испытания в режиме форсированных нагрузок, долговечность роликов в 5 – 9 раз превышает долговечность шариков.

Существенное влияние на интенсивность и характер изнашивания оказывают температурные условия рабочих процессов. В связи с этим обеспечение *оптимальных тепловых режимов* работы различных сопряжений, узлов и агрегатов автомобилей играет существенную роль в повышении их долговечности. Оптимизация теплового режима работы с целью минимизации интенсивности изнашивания особенно важна для такого нагруженного агрегата, как двигатель.

Регулирование температуры нагрева деталей двигателя осуществляется за счет охлаждения жидкостей (или воздуха) и картерного масла, а также за счет различных конструктивных решений. К ним прежде всего следует отнести: создание теплоизолирующих прорезей (в головках блока и поршнях), заполнение пустотелых впускных клапанов металлическим натрием, использование управляемых электроникой термостатов, охлаждение днищ поршней струей масла из специальных форсунок в блоке цилиндров.

На современных тяжелых грузовиках внедряются такие конструктивные решения, как отключение вентилятора зимой или при прогреве с помощью фрикционной пневмоуправляемой муфты, электроподогрев двигателя и следящий за температурой масла водомасляный теплообменник, специальный радиатор для охлаждения редуктора главной передачи и т.д.

К мероприятиям по обеспечению нормальных условий работы относятся конструкторские разработки по *оптимизации смазки трущихся поверхностей*. В конструкциях современных машин стремятся обеспечить жидкостное или по крайней мере граничное трение сопряженных деталей, снижающих интенсивность их изнашивания. У современных двигателей все основные сопряжения смазываются под давлением. Этот прогрессив-

ный вид смазки все шире используется и в других механизмах автомобиля, например в трансмиссии.

Обеспечение оптимальных условий изнашивания в зоне трения предусматривает *создание высококачественных устройств для очистки масел, топлива и воздуха*. Эффективность фильтров очистки зависит в основном от качества и количества используемой в них специальной (пропитанной и термически обработанной) фильтрующей бумаги и оценивается тонкостью очистки, т.е. размером задерживаемых микрочастиц загрязнения.

Особо высокие требования предъявляются в настоящее время к масляным фильтрам, которые наряду с высокой степенью очистки (до 10 – 20 мкм) должны обеспечивать гарантированное прохождение масла через фильтрующий элемент, устойчивость против давления, надежную работу обратного и перепускного клапанов. Применение таких фильтров позволяет повысить ресурс двигателя на 20 – 25 %.

Повышение уровня ремонтпригодности

Весьма перспективным направлением повышения надежности машин является совершенствование их конструкций с позиций требований *ремонтпригодности*.

В области автомобилестроения в последние годы осуществлен целый комплекс конструкторско-технологических мероприятий по повышению надежности автомобилей, однако они далеко не в полной мере отвечают требованиям ремонтпригодности. Это приводит к большим материальным затратам на ремонтные и профилактические работы.

В связи с тем, что объемы, характер и содержание работ, осуществляемых при ТО и ремонте, различны, следует разделять такие понятия ремонтпригодности, как эксплуатационная и ремонтная технологичности.

Эксплуатационная технологичность представляет собой свойство конструкции автомобиля, которое характеризует его приспособленность к поддержанию работоспособности, т.е. проведению всех видов ТО и эксплуатационных ремонтов в условиях АТП.

Ремонтная технологичность – свойство конструкции автомобиля, которое характеризует его приспособленность к ремонтным работам, осуществляемым для восстановления утраченной работоспособности с целью обеспечения заданного ресурса.

Ремонтпригодность автомобиля определяется его контролепригодностью, доступностью, легкосъемностью, взаимозаменяемостью, преемственностью оборудования.

Контролепригодность – свойство автомобиля, заключающееся в его приспособленности к контролю технического состояния методами технической диагностики.

Доступность конструкции узлов автомобиля – свойство, характеризующее их приспособленность к быстрому и удобному осуществлению технологических операций при устранении отказов, проведении ТО и ремонтов.

Легкосъемность – свойство конструкции автомобиля, характеризующее приспособленность к выполнению операций разборки и сборки, необходимых для замены отказавших деталей.

Преимственность оборудования означает возможность использования уже имеющегося на АТП, СТОА, АРЗ оборудования для осуществления ТО и ремонта автомобилей новых моделей.

Для обеспечения высокого уровня ремонтпригодности современные автомобили должны отвечать ряду требований к эксплуатационной и ремонтной технологичности.

1. При разработке новых автомобилей необходимо максимально применять нормализованные и стандартизованные детали и узлы, хорошо себя зарекомендовавшие в существующих моделях. При этом с целью сокращения номенклатуры инструмента и приспособлений для нужд эксплуатации и ремонта необходимо минимизировать количество типоразмеров стандартных элементов.

2. В сложных крупногабаритных деталях трущиеся поверхности должны быть упрочнены таким образом, чтобы сопротивляемость изнашиванию обеспечивала межремонтный ресурс агрегата. В том случае, когда этого достигнуть нельзя, конструкция детали должна предусматривать легко сменяемые элементы, подверженные изнашиванию (втулки, вкладыши, гильзы цилиндров и др.).

3. Для всех деталей, работающих на износ, заводами-изготовителями должны быть установлены ремонтные (допустимые) и предельные размеры. При этом для деталей, подлежащих расточке (или перешлифовке) под очередной ремонтный размер, предельный размер необходимо устанавливать из условий обеспечения требуемой жесткости. Соблюдение этих требований особенно важно для таких деталей, как блоки цилиндров, тормозные барабаны и т.д., толщина стенок которых уменьшается и, следовательно, ослабляется жесткость.

4. Детали, узлы, агрегаты, ресурс которых меньше межремонтного ресурса автомобиля, должны быть сконструированы так, чтобы к ним был обеспечен хороший доступ для контрольных и регулировочных работ, а при достижении предельного износа – для быстрой замены.

5. Конструкция автомобиля должна обеспечить проведение регулировочных, крепежных и других работ ТО и ТР с наименьшими затратами времени и средств.

6. При конструировании должны быть предусмотрены возможность быстрого отыскания отказов и неисправностей, возникающих в различных узлах и агрегатах, свободный доступ к ним и легкость полной разборки.

7. В целях обеспечения демонтажа деталей с прессовой или переходной посадкой в их конструкции целесообразно предусмотреть специальные приливы, пазы или резьбовые отверстия, позволяющие при разборке применять простейший демонтажный инструмент.

Резервирование элементов и систем

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 системы питания двигателя (рис. 5.5, а), например, включающей топливозаборную трубку 1 с сетчатым фильтром, фильтр грубой очистки 2 и фильтр тонкой очистки 3, показывает, что при засорении (отказе) любого из них нарушается подача топлива. Такое соединение фильтров следует считать последовательным. Если вероятность безотказной работы каждого из фильтров равна p_1, p_2, p_3 , то вероятность безотказной работы системы очистки топлива в целом определяется из выражения

$$P = p_1 p_2 p_3. \quad (5.1)$$

Система смазки двигателя кроме масляного насоса 6 включает в себя также 3 фильтра: маслозаборника 4, тонкой очистки 5 и центробежной очистки 7 (рис. 5.5, б). Фильтры работают независимо один от другого, и засорение любого из них не отражается на работе остальных. Такое включение фильтров следует считать параллельным. Вероятность безотказной работы фильтров при такой системе их соединения определяется по формуле

$$P = 1 - (1 - p_4)(1 - p_5)(1 - p_7), \quad (5.2)$$

где p_4, p_5, p_7 – вероятности безотказной работы фильтров маслозаборника, тонкой очистки и центробежной очистки соответственно.

Анализ последней формулы показывает, что параллельное соединение элементов значительно повышает безотказную работу, а следовательно, и надежность всей системы. Поэтому параллельное включение элемен-

тов системы является основой весьма важного метода повышения надежности – структурного резервирования.

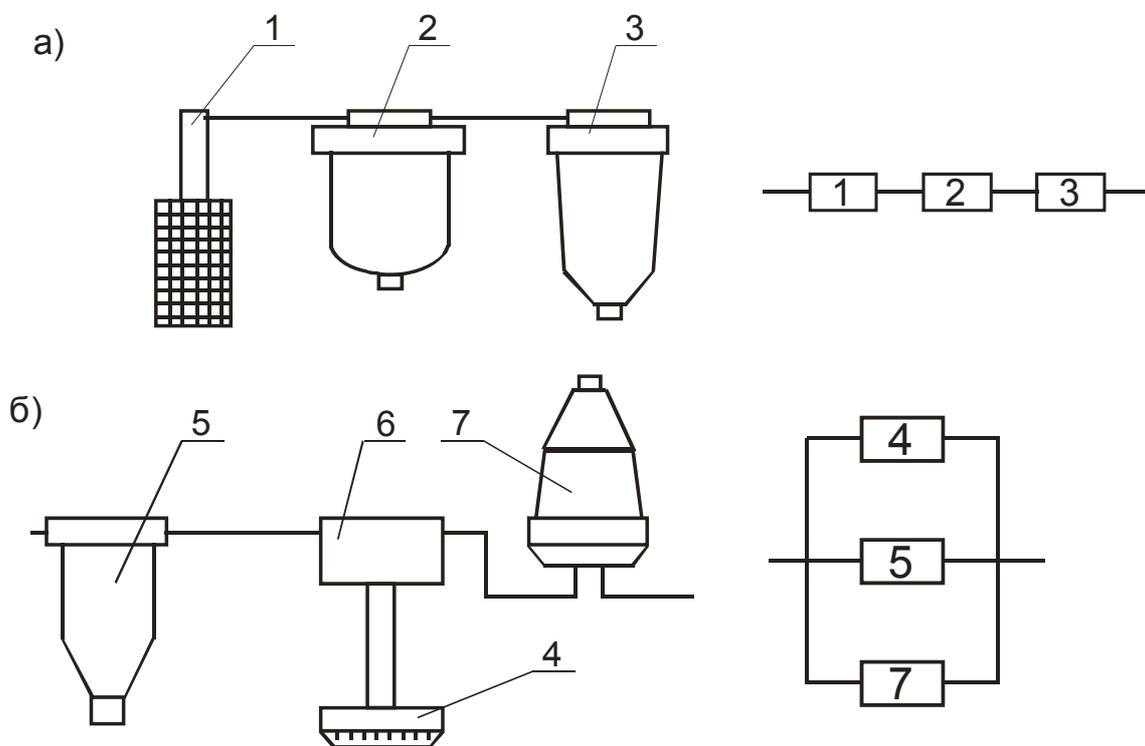


Рис. 5.5. Схемы соединения фильтров:
а – в системе питания; б – в системе смазки

Резервирование – это метод повышения надежности объекта введением избыточности, т.е. дополнительных средств и возможностей сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. Если избыточность достигается использованием дополнительных элементов структуры объекта, то такое резервирование называют структурным.

При структурном резервировании конструктивные элементы могут быть *основными* и *резервными*. Основным называют элемент структуры объекта, максимально необходимый для выполнения объектом заданных функций. Резервный элемент предназначен для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Использование структурной избыточности ведет к усложнению системы, её удорожанию. Поэтому к такому виду резервирования прибегают в системах, отказы которых приводят к аварийным ситуациям. В автомобильной технике это в основном рулевые управления и тормозные системы.

Отказы тормозных систем автомобиля стоят на первом месте среди наиболее тяжелых по своим последствиям, так как приводят в большинстве случаев к серьезным дорожно-транспортным происшествиям. По этой

причине в тормозной системе широко применяются структурное и другие виды резервирования.

На автомобиле, как правило, имеются две основные тормозные системы – рабочая и стояночная. Рабочая тормозная система включает две подсистемы – тормоза передних 1 и задних 2 колес (рис. 5.6). Примем условно вероятности безотказной работы подсистем $P_1 = 0,9$, $P_2 = 0,9$ и рассмотрим основные схемы рабочей тормозной системы.

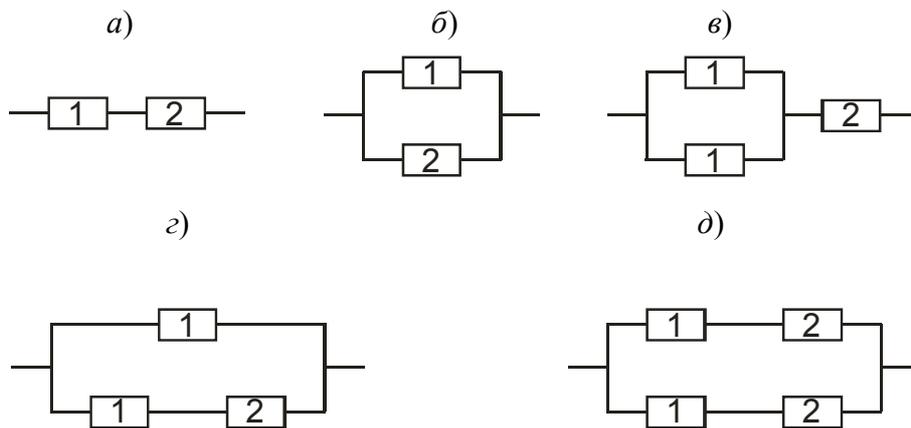


Рис. 5.6. Принципиальные схемы тормозных систем с резервированием различных подсистем

Тормозная система с одним контуром (рис. 5.6, а) включает в себя обе подсистемы, соединенные последовательно. Вероятность безотказной работы невысока и составляет

$$P_a = P_1 P_2 = 0,81.$$

Для повышения надежности предлагается введение двухконтурной системы (рис. 5.6, б), в которой подсистемы 1 и 2 включены параллельно. В этом случае

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

Очевидный недостаток этой системы состоит в том, что отказ любой подсистемы снижает эффективность торможения. Можно поступить иначе. Сохранить в качестве основной системы тормозные механизмы всех колес и ввести дополнительную подсистему передних или задних тормозов. Эта дополнительная подсистема может быть включена параллельно одной из подсистем (рис. 5.6, в) или параллельно всей системе (рис. 5.6, д). В этих случаях вероятности безотказной работы определяются из выражений:

$$P_v = [1 - (1 - P_1)^2] P_2 = 0,891;$$

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

Преимущество схемы (рис. 5.6, д) состоит в том, что надежность тормозной системы выше. При отказе подсистемы 2 тормозная система,

выполненная по этой схеме, сохраняет работоспособность, а выполненная по схеме (рис. 5.6, в), частично теряет её.

Схема (рис. 5.6, д) с резервированием системы в целом имеет то преимущество, что при отказе любого элемента это не отражается на тормозных качествах автомобиля. Однако по надежности такая схема общего резервирования несколько уступает раздельному резервированию, т.е. $P_0 = 1 - (1 - P_1P_2)^2 = 0,964$ по сравнению с $P_2 = 0,981$.

Таким образом, метод резервирования элементов и систем при проектировании машин существенно повышает их надежность.

5.2. Обеспечение надежности машин при их производстве

В общем комплексе проблем обеспечения надежности важное значение имеет этап изготовления и доводки машин.

Доводкой конструкции машины по параметрам надежности называется комплекс неоднократно повторяющихся процессов: испытания – доработка конструкторской документации по результатам испытаний – изготовление новых элементов конструкции. Если проектные параметры надежности не достигаются, проводят доработку конструкции и доводочные испытания машины, позволяющие оценить влияние вносимых в конструкцию и технологию изготовления изменений для повышения надежности и качества машины.

Доводку как начальный этап изготовления машины следует начинать с изготовления экспериментального образца в целях проверки не только её функционального назначения, но и всего комплекса задач по обеспечению надежности, включая получение полной и достоверной информации о конструкторских и технологических недостатках машины, о возникающих в процессе испытаний неисправностях и отказах элементов. Эта информация поступает в лабораторию надежности предприятия, где подвергается тщательному изучению и анализу, по результатам которых устанавливают наиболее вероятные причины отказов и осуществляют доработку конструкторской и технологической документации.

Одной из составных частей этапа доводки машины является отработка технологических процессов, обеспечивающих необходимый ресурс элементов конструкции – *технологическое обеспечение надежности машин*.

Под технологическим обеспечением надежности машин понимается стабильное обеспечение в процессе серийного производства параметров надежности и качества машин, достигнутых при изготовлении опытного образца и установочной партии. Надежность машин при их серийном производстве обеспечивается за счет следующих основных мероприятий:

– стабильности технологических процессов изготовления каждого элемента конструкции, сборки отдельных узлов, агрегатов и машины в целом;

- входного контроля поступающих материалов и комплектующих;
- максимального снижения или вообще исключения вредной технологической наследственности, возникающей в технологических процессах изготовления элементов конструкции машин;
- контроля качества и надежности продукции в процессе её изготовления.

Стабильность технологических процессов определяется гарантированным обеспечением необходимой точности и качества изготовления деталей, сохранением свойств материалов, технологической надежностью применяемого оборудования.

Точность изготовления деталей, которая определяется точностью геометрических размеров рабочих поверхностей и их взаимного расположения, зависит прежде всего от уровня используемого оборудования, степени автоматизации производственных процессов. С повышением точности изготовления уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает долговечность автомобилей.

Существенное влияние на надежность машин, их узлов и агрегатов оказывает и качество рабочих поверхностей деталей, их шероховатость и макрогеометрия. По данным ряда исследований получены следующие зависимости интенсивности изнашивания деталей от шероховатости (рис. 5.7).

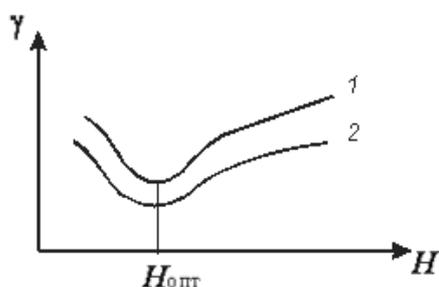


Рис. 5.7. Зависимости интенсивности изнашивания γ деталей от шероховатости H :
1 – чугун по стали;
2 – бронза по стали

Из графика видно, что минимальное значение интенсивности изнашивания соответствует какой-то определенной величине шероховатости $H_{\text{опт}}$. При $H > H_{\text{опт}}$ интенсивность изнашивания возрастает. Возрастает она и при $H < H_{\text{опт}}$, так как при трении слишком гладких поверхностей ухудшаются условия смазки (она плохо удерживается) и возникают условия для молекулярного схватывания.

В связи с этим одной из основных задач машиностроения является доведение шероховатости рабочих поверхностей до величин, близких к $H_{\text{опт}}$.

Значительное влияние на эксплуатационную надежность узлов и агрегатов машин оказывает и макрогеометрия деталей, т.е. различные отклонения от геометрической формы. Например, для двигателя ЯМЗ были по-

лучены следующие зависимости износа гильз цилиндров от их овальности и конусности (рис. 5.8).

Кроме износостойкости точность и качество изготовления деталей оказывает существенное влияние на выносливость, сопротивление ударным нагрузкам, коррозионную стойкость.

Высокие характеристики качества поверхностей деталей достигаются применением на заключительных стадиях их изготовления таких методов обработки, как тонкое шлифование, хонингование, суперфиниширование (сверхдоводка), полирование. Данные операции необходимы не только для уменьшения шероховатости, но и для удаления тонкого дефектного поверхностного слоя с низкими физико-механическими свойствами. Точность изготовления деталей, элементов конструкции машин должна контролироваться с использованием высокоточной измерительной аппаратуры и по методикам, которые обосновываются в операционной технологической документации.

Средства контроля могут иметь разный уровень автоматизации – от визуальных сигналов для наладки оборудования, изменения режимов его работы до самонастраивающихся систем. Системы активного контроля, особенно с самонастройкой, являются важным звеном автоматизированного производства с управлением параметров качества изделия.

Сохранение свойств материалов элементов конструкции на этапе серийного производства обеспечивается путем постоянного материаловедческого контроля и контроля качества за термической обработкой деталей. Контроль за качеством термической обработки принципиально важен для высокоуглеродистых сталей и легированных сплавов.

Технологическая надежность оборудования – это его свойство сохранять в заданных пределах и во времени значения показателей, определяющих качество осуществления технологического процесса. К показателям качества технологического оборудования относятся его геометрическая точность, жесткость, виброустойчивость и т.д., которые определяют точность обработки, качество поверхности и физические характеристики материала обрабатываемой детали.

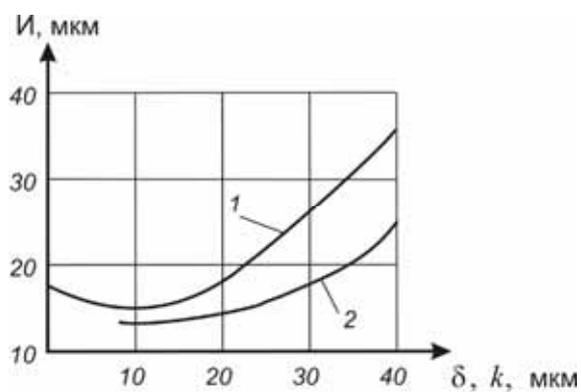


Рис. 5.8. Зависимости износа И от значений овальности δ (кривая 1) и конусности k (кривая 2) гильз цилиндров

В процессе эксплуатации технологическое оборудование постепенно теряет свои начальные характеристики, что приводит к снижению качественных показателей технологического процесса. Восстановление работоспособности при этом связано, как правило, с большими временными и материальными затратами. Постепенное ухудшение начальных характеристик оборудования приводит к уменьшению точности изготовления, росту вероятности получения некачественной продукции, снижению надежности изготавливаемой машины.

Входным контролем называют комплекс мероприятий по сплошному или выборочному контролю качества материалов, полуфабрикатов и заготовок. Несмотря на то что все поступающие материалы имеют сопроводительные документы о выполнении требований ГОСТов и технических условий на них, в большинстве случаев в этих документах не содержится информация для оценки надежности элементов машин. В связи с этим одним из условий обеспечения высокой надежности ответственных элементов конструкции машин является входной контроль различных характеристик исходных материалов (прочности, твердости и т.д.).

Для ответственных деталей, изготавливаемых из профильного проката без механической обработки, необходимо контролировать, кроме того, геометрические характеристики и отсутствие внутренних дефектов (трещин, засорений, рыхлот и т.д.) методами неразрушающего контроля. В литых заготовках и полуфабрикатах со сварными швами входной контроль должен быть направлен также на выявление литейных дефектов (пустот, трещин и т.д.) методами рентгеноскопического анализа, цветной, люминесцентной и ультразвуковой дефектоскопии.

Технологическая наследственность возникает в технологических процессах изготовления деталей. Основную роль в формировании показателей качества выпускаемых изделий играют финишные операции техпроцесса, однако часть свойств передается и с промежуточных операций изготовления. Явление переноса свойств объекта от предшествующих операций к последующим называется *технологическим наследованием*.

Носителями технологической наследственности являются материал детали и её геометрические формы. Наследуются такие дефекты изготовления заготовок, как несплошность материала деталей (пустоты, раковины, трещины), возникновение непредсказуемых химических соединений, изменение заданного химического состава.

При механической обработке поверхности детали могут передаваться следующие виды технологической наследственности:

- непрогнозируемое изменение микро- и макрорельефа, снижающее износостойкость;
- возникновение остаточных напряжений;
- образование наклепа;
- внедрение инородных элементов в поверхность трения (например абразивных зерен);
- непрогнозируемое изменение геометрии элементов конструкции.

В процессе изготовления изделия носители наследственной информации проходят различные барьеры, задерживаясь на них частично или полностью. Существенным барьером для дефектов заготовок, например, служат такие методы их изготовления, как литье под вакуумом, принудительное заполнение форм расплавом, формирование объемных деталей в режиме сверхпластичности и др. Барьером на пути вредных технологических последствий при механической обработке поверхностей деталей являются:

- алмазное выглаживание поверхности;
- «залечивание» поверхностных дефектов и подповерхностных повреждений методом термоциклической обработки;
- детонационное и плазменное напыление специальных покрытий на поверхность деталей;
- пластическое деформирование путем гидродробеструйной обработки и т.д.

Технологическая наследственность в большинстве случаев оказывает отрицательное влияние на показатели качества и является побочным процессом при обработке изделия. Поэтому стремятся исключить передачу погрешностей обработки с операции на операцию и сделать их как бы независимыми в технологическом отношении. Наиболее рациональным будет такой технологический процесс, где уже на начальных операциях изготовления происходит практически полная ликвидация отрицательных свойств и они не наследуются финишными операциями.

Контроль качества продукции в процессе её изготовления является одним из основных методов обеспечения надежности машин. Под контролем понимается проверка соответствия продукции или процесса, от которого зависит её качество, установленным техническим требованиям. По-

этому контроль может относиться как к оценке качественных и количественных характеристик свойств продукции, так и к контролю режимов, характеристик и параметров технологического процесса.

Для оценки качества продукции при массовом производстве в автомобилестроении широко используются статистические методы, когда о качестве изделий судят по результатам выборочного контроля. При таком контроле обосновывается достаточный объем выборки изделий в зависимости от объема серии и необходимой точности оценки качества.

Оценка уровня качества продукции – необходимый, но недостаточный вид статистического контроля при изготовлении машин. Статистические методы контроля используют и для оценки параметров технологического процесса. Контролируются характеристики качества оборудования, технологической оснастки и инструмента, проверяются методы их наладки, а также подвергаются контролю параметры изготавливаемых изделий.

Принципиальная разница по сравнению с контролем качества продукции в этом случае заключается в том, что анализируются процесс и тенденции развития или стабилизации технологического процесса, близость его параметров к граничным значениям и т.д.

Для повышения надежности изделий в современном машиностроении широко используют различные *упрочняющие технологии*. За счет введения в технологические процессы изготовления специальных видов обработки повышают износостойкость, усталостную прочность и коррозионную стойкость изделий. К ним прежде всего относятся различные процессы термической и химико-термической обработки, упрочняющие технологии, основанные на пластическом деформировании поверхностей, нанесение износостойких и коррозионностойких покрытий.

Термическая обработка деталей – один из самых эффективных и распространенных методов их упрочнения. В автомобилестроении получили применение следующие виды термообработки:

- объемная закалка стальных деталей с последующим отпуском;
- поверхностная закалка стальных и чугунных деталей с нагревом токами высокой частоты;
- термическая обработка сталей пониженной прокаливаемости для контурного упрочнения деталей сложного профиля.

Химико-термическая обработка позволяет изменять химический состав поверхностных слоев металла с целью повышения служебных свойств

деталей. Наибольшее распространение для упрочнения деталей получили цементация, азотирование, нитроцементация, диффузная металлизация (хромирование, борирование, алитирование, силицирование).

Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием применяют для повышения долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок или коррозионных средах и имеющих концентраторы напряжений. Предел выносливости деталей в результате пластического деформирования поверхностных слоев увеличивается во многих случаях в 1,5 – 2 и более раз, увеличивая тем самым в несколько раз сроки службы деталей.

Повышение усталостной прочности при наклепе обусловлено изменением формы и размеров кристаллических зерен, возникновением благоприятных сжимающих напряжений. Вместе с тем в результате наклепа повышается твердость рабочих поверхностей и сопротивляемость их износу и коррозии, уменьшается шероховатость поверхностей. Такие детали, как пружины, рессоры, шестерни, шатуны и другие подвергают наклепу дробеструйной обработкой. Коленчатые валы, оси, полуоси и поворотные цапфы весьма эффективно упрочняют обкаткой роликами и шариками. Рабочие поверхности втулок, верхних головок шатунов, гильз цилиндров, отверстий в корпусах коробок передач и задних мостов обрабатывают раскаткой и дорнованием.

Чистовая обработка деталей методом пластического деформирования обеспечивает высокую чистоту обрабатываемой поверхности и позволяет избежать возникновения концентраторов напряжения снятием неровностей при обкатывании, раскатывании, алмазном выглаживании и т.д. В результате улучшаются все механические характеристики поверхностного слоя (твердость, пределы текучести и упругости).

В машиностроении широко применяют также различные антифрикционные и антикоррозионные покрытия, нанесенные методами наплавки или металлизации, напылением, электрохимическим или другими способами. С помощью таких методов поверхностному слою придают практически любые свойства, независимо от исходного материала. Широко распространены также методы гальванического наращивания: хромирование, никелирование, борирование, цинкование, кадмирование.

В табл. 5.2 приведены данные о возможности повышения ресурса деталей машин перспективными методами упрочнения их поверхностей.

Таблица 5.2

Метод упрочнения рабочих поверхностей	Результат упрочнения
1. Поверхностно-пластическое деформирование деталей, работающих при циклических нагрузках	Повышение предела выносливости в 2 – 2,5 раза за счет образования остаточных сжимающих напряжений
2. Создание макрорельефов пневмогидроструйной обработкой или алмазной шлифовальной накаткой	
3. Ионно-плазменная и химико-термическая обработка поверхности (ионное азотирование, ионно-вакуумная цементация)	Увеличение ресурса деталей в 1,2 – 1,8 раза
4. Нанесение специальных покрытий на рабочие поверхности плазменным, детонационным и другими способами	Повышение ресурса деталей, подверженных изнашиванию и контактными нагрузкам, в 1,5 – 2 раза
5. Обработка поверхностей лазерными лучами	Улучшение коррозионной стойкости и износостойкости поверхностей в 1,4 – 1,6 раза

5.3. Обеспечение надежности машин в эксплуатации

Эффективность использования машин по назначению в значительной мере определяется их надежностью, в связи с чем задачи обеспечения надежности занимают важное место среди общих задач эксплуатации.

Эксплуатация автомобиля, например, длится несколько лет и включает транспортирование, хранение, транспортную работу, техническое обслуживание и ремонт. При этом следует учитывать, что эксплуатация является более длительным, трудоемким и дорогим процессом, чем производство. Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт за весь период эксплуатации в 3 – 4 раза превышают стоимость автомобиля. Поэтому поддержание и восстановление надежности в эксплуатации являются важнейшей составной частью общей системы обеспечения надежности, предыдущими этапами которой являются проектирование и производство, где закладываются и обеспечиваются исходные показатели надежности.

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. (рис. 5.9).

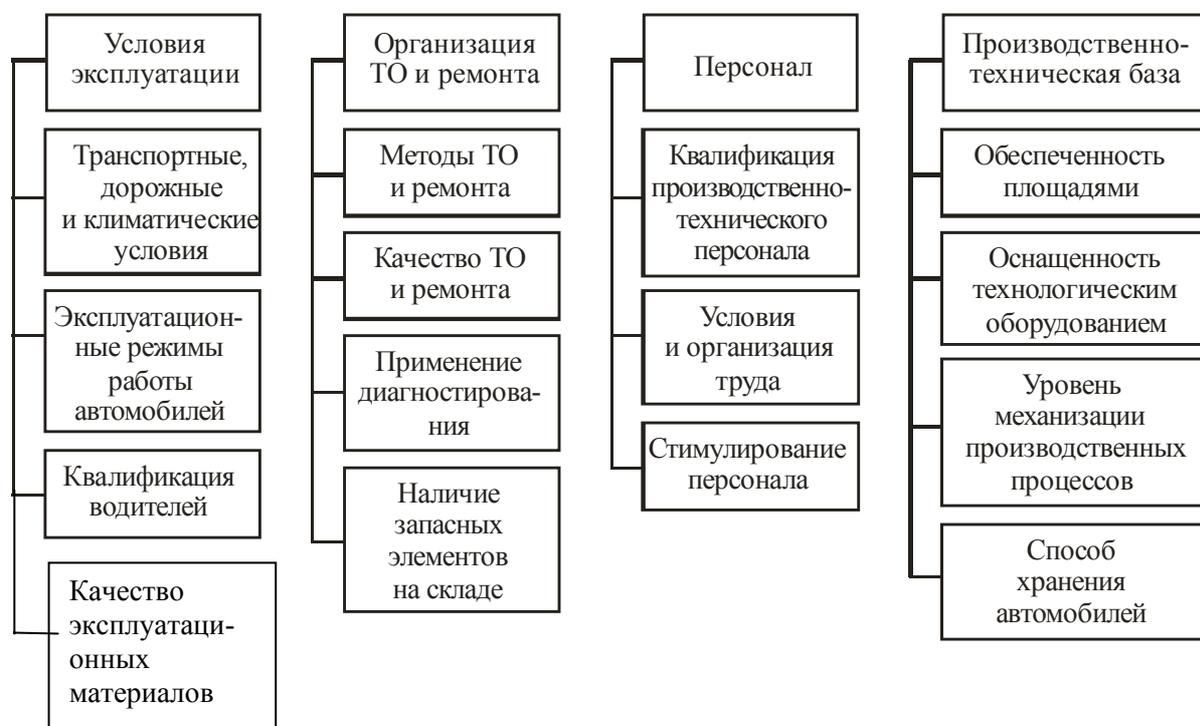


Рис. 5.9. Факторы, влияющие на показатели надежности автомобилей в эксплуатации

5.3.1. Условия эксплуатации автотранспортных средств

Дорожные и климатические условия

Дорожные условия характеризуются технической категорией дороги, видом и качеством дорожного покрытия, а также рельефом местности. 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.

Запыленность воздуха при движении автомобиля по асфальтовому шоссе в средних летних условиях составляет примерно 15 мг/м^3 , а по грунтовым дорогам доходит до 6000 мг/м^3 . Определенное количество частиц дорожной пыли попадает и в топливные баки автомобилей. Особенно это характерно для автомобилей-самосвалов, а также при работе грузовых

автомобилей на стройках, в карьерах и на грунтовых дорогах, когда концентрация загрязнения достигает 200 – 300 г на одну тонну топлива.

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 до $+15$ °C (рис. 5.10).

Агрессивность окружающей среды связана с коррозионной активностью воздуха, что характерно при эксплуатации автомобилей в прибрежных морских районах или когда они используются для постоянной пере-

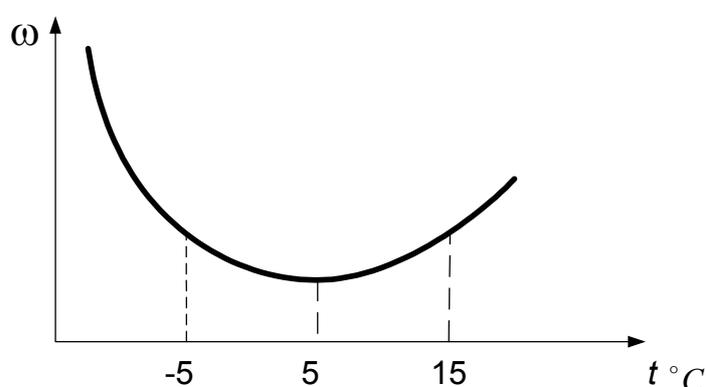


Рис. 5.10. Зависимость количества отказов автомобиля ω от температуры окружающего воздуха t °C

возки химических грузов. Такие условия эксплуатации вызывают интенсивную коррозию деталей, сокращая нормативный ресурс автомобиля и периодичность выполнения профилактических обслуживаний на 10 %.

Интенсивность изменения технического состояния автомобиля зависит и от сезонных колебаний условий эксплуатации, вызываемых

колебаниями температуры воздуха, дорожными условиями. В осенне-зимний период, например при выпадении осадков в виде дождя и снега, условия движения автомобиля ухудшаются.

Влияние дорожных и климатических условий на надежность учитывается «Положением о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта», в котором приведены соответствующие корректирующие коэффициенты.

При изменении условий эксплуатации происходит изменение не только интенсивности, но и вида изнашивания деталей и сопряжений. Например, абразивное изнашивание цилиндра-поршневой группы двигателя в наибольшей степени проявляется в летних условиях, а коррозионно-механическое – в зимних. Поэтому летом необходимо принимать меры по предотвращению попадания в двигатель пыли, а зимой – следить за тепловым состоянием, не допускать переохлаждения.

Эксплуатационные режимы работы автомобиля

При движении автомобиля режимы его работы постоянно изменяются, т.е. имеют место так называемые *нестационарные (неустановившиеся) режимы*. В целом эксплуатационный режим работы автомобиля определяется комплексом скоростных, нагрузочных и тепловых режимов, обусловленных климатическими условиями, рельефом местности, качеством дорожных покрытий, квалификацией водителя и другими факторами.

Нестационарные режимы работы являются преобладающими при эксплуатации автомобилей и составляют 90 – 95 % в условиях городского интенсивного движения, 85 – 90 % при движении по грунтовым дорогам и 30 – 35 % на загородных автомагистралях от всего времени движения. Это приводит к увеличению интенсивности изнашивания деталей и сопряжений, существенному снижению ресурса. При нестационарных режимах работы двигателя в сравнении с установившимися интенсивность изнашивания поршней увеличивается в 1,2 – 1,8 раза, поршневых колец в 2,5 – 3,5 раза, подшипников коленчатого вала в 1,4 – 1,8 раза. В среднем износ двигателей при работе на неустановившихся режимах возрастает в 1,2 – 2 раза.

В этой связи при эксплуатации автомобиля большое значение имеет разработка рациональных методов вождения. Следует исключить при движении способ «разгон – накат», так как он приводит к увеличению изнашивания деталей двигателя и агрегатов трансмиссии. Это объясняется тем, что ухудшается качество смазки механических систем двигателя, возникают дополнительные циклические нагрузки в агрегатах трансмиссии (сцеплении, карданном валу, ведущем мосту).

Разновидностью неустановившегося режима работы автомобиля является режим принудительного холостого хода и торможения двигателем. В условиях городского движения эти режимы составляют от 5 до 20 % от общего времени движения автомобиля. Такой режим нередко используется при движении под уклон с включенной передачей. Подача топлива в цилиндры при этом соответствует режиму холостого хода при минимальных оборотах, а частота вращения коленчатого вала, обусловленная скоростью вращения колес автомобиля, увеличивается. В результате топливовоздушная смесь в цилиндрах обедняется, сгорание происходит с перебоями и негоревшее топливо частично выбрасывается в выпускную систему, а частично конденсируется, разжижая смазку и способствуя интенсификации изнашивания. Поэтому при вождении продолжительность работы двигателя на режиме принудительного холостого хода желательно по возможности сокращать.

Решающее влияние на показатели надежности двигателя оказывают нагрузочный и скоростной режимы его работы. Нагрузка при этом характеризуется величиной среднего эффективного давления в цилиндрах P_e , а

скоростной режим – частотой вращения коленчатого вала двигателя n . С увеличением частоты вращения коленчатого вала при постоянной нагрузке P_e повышаются износы поверхностей трущихся деталей (рис. 5.11, а). Это связано с ростом инерционных сил, механических нагрузок на детали кривошипно-шатунного механизма и цилиндра-поршневой группы, изменением теплового режима двигателя.

Из рис. 5.11, а видно, что с увеличением n возрастают износы деталей, причем наиболее интенсивный износ наблюдается в зоне больших оборотов коленчатого вала. В связи с этим эксплуатация двигателей на повышенных оборотах крайне нежелательна. Некоторый рост износов деталей при малых n связан со снижением давления в системе смазки двигателей, а следовательно, с ухудшением гидродинамического режима их работы.

Существенное влияние на интенсивность изнашивания деталей двигателя оказывает и нагрузочный режим (среднее эффективное давление в цилиндрах P_e). С ростом нагрузки, т.е. при увеличении подачи топливовоздушной смеси, интенсивность изнашивания деталей возрастает практически прямо пропорционально (рис. 5.11, б). Это связано с увеличением объема сгораемого топлива в цилиндрах и как следствие с возрастанием механических нагрузок на детали цилиндра-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма.

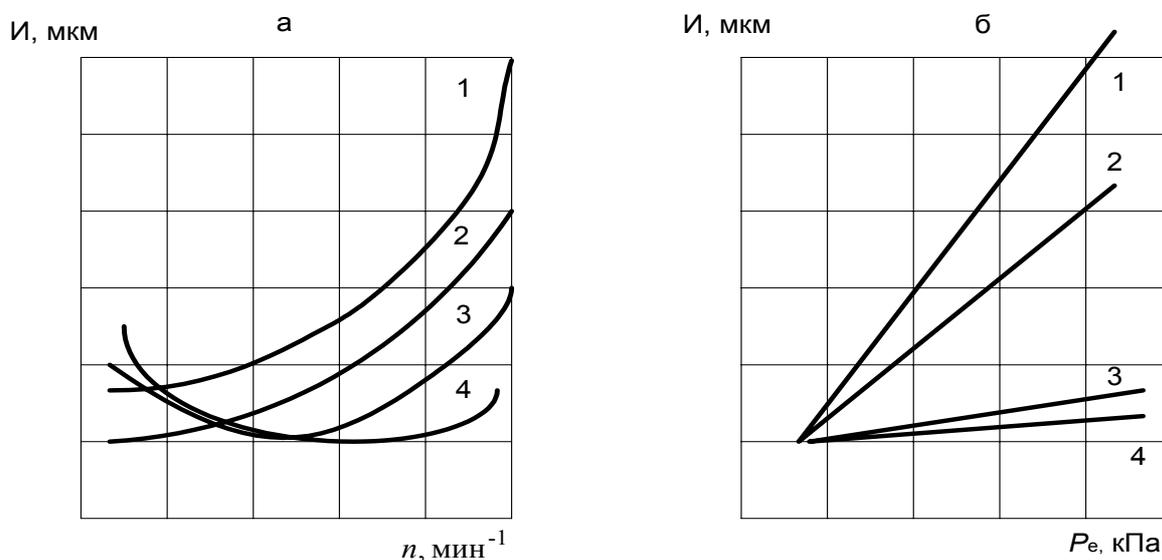


Рис. 5.11. Влияние частоты вращения коленчатого вала n и среднего эффективного давления P_e на интенсивность изнашивания деталей I двигателей ЗМЗ:
 а – при $P_e = \text{const}$; б – при $n = \text{const}$; 1 – цилиндры; 2 – поршневые кольца;
 3 – шейки коленчатого вала; 4 – стержни клапанов и направляющие втулки

Таким образом, повышенные скоростной и нагрузочный режимы приводят к увеличению интенсивности изнашивания деталей двигателя и

снижению его ресурса. При этом, как следует из рис. 5.11, повышенный скоростной режим вызывает большее увеличение износов деталей двигателя, чем повышенный нагрузочный режим. Поэтому с точки зрения рационального использования ресурса двигателя предпочтительнее движение на повышенных передачах при пониженных оборотах коленчатого вала. Желательно также по возможности спокойное движение, без резких изменений режимов работы. Работа же автомобиля на коротких расстояниях с длительными остановками и частыми пусками двигателя увеличивает интенсивность изнашивания деталей.

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

Зависимость интенсивности изнашивания от температуры является довольно сложной, однако с достаточной для практических целей точностью для граничного и близких к нему видов трения ее можно считать линейной:

$$\Delta\gamma = b\Delta t, \quad (5.3)$$

где $\Delta\gamma$ – изменение интенсивности изнашивания; b – коэффициент пропорциональности; Δt – изменение температуры.

Для поверхностей, смазываемых под давлением, зависимость интенсивности их изнашивания от изменения температуры масла в картере двигателя Δt отличается от линейной. Существует оптимальная температура масла, при которой интенсивность изнашивания минимальна (рис. 5.12). При большем или меньшем ее значении интенсивность износа деталей цилиндро-поршневой группы возрастает.

Оптимальной температуре картерного масла соответствует оптимальное значение температуры поверхностей теплонагруженных деталей. При ее повышении закономерно изменяются температура в зоне трения, химико-физические свойства структуры поверхностей деталей, смазывающая способность масла, коэффициент трения и как следствие интенсивность изнашивания.

При пониженных температурах деталей цилиндро-поршневой группы интенсифицируются процессы коррозионно-механического изнашива-

ния, так как на поверхностях конденсируются пары воды и кислот, образующихся в отработавших газах. В дальнейшем образовавшиеся пленки

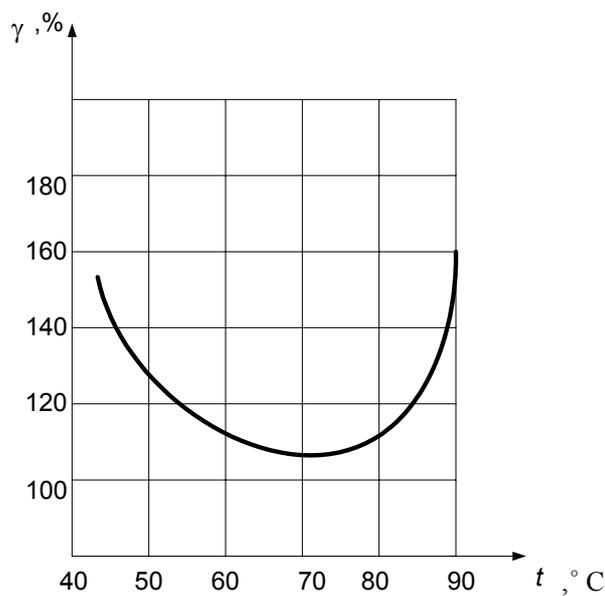


Рис. 5.12. Изменение интенсивности изнашивания γ цилиндров двигателя (расстояние 8 мм от верхней плоскости блока) от температуры масла в картере t

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.

Таким образом, при изменении скоростных и нагрузочных режимов работы сопряжений изменяется температура в зоне трения и как следствие интенсивность изнашивания деталей. Поэтому для создания долговечной

работы изделий необходимо постоянно следить за соблюдением режимов их работы, не допуская перегрузок.

Качество эксплуатационных материалов

Большое влияние на интенсивность изнашивания деталей автомобиля и прежде всего двигателя оказывает качество используемых эксплуатационных материалов – топлива, масла, охлаждающей жидкости.

Применяемые топлива влияют на динамику процесса сгорания, условия смазывания поверхностей трения, интенсивность нагарообразования и другие параметры работы двигателя, определяющие вид и интенсивность изнашивания деталей.

Моторные масла кроме разделения трущихся поверхностей и уменьшения сил трения выполняют также функции отвода тепла в сопряжениях. В современных форсированных автомобильных двигателях масляная пленка подвергается воздействию высоких температур и давлений, что сопряжено с постоянной опасностью ее повреждения, ускорения процессов окисления, старения масла, образования нагара и лаков на деталях цилиндро-поршневой группы и закоксовывания колец.

Наиболее интенсивно процесс старения масла протекает в зоне поршневых колец двигателя, где тонкая пленка масла находится под влиянием высокой температуры и концентрации продуктов сгорания топлива.

За последние годы значительно повышено качество смазочных материалов за счет целого пакета сложных и совершенных присадок (антифрикционных, антиокислительных, вязкостных, моющих и т.д.), которые резко снижают интенсивность изнашивания, защищают от отложений и коррозии, создают нормальные условия работы в экстремальных режимах. К настоящему времени созданы легкотекучие моторные масла с высокой термостабильностью и прокачиваемостью, обеспечивающие легкий запуск холодного двигателя.

Использование таких масел существенно повышает ресурс двигателя, так как на запуск и последующий прогрев приходится до 75 % его суммарного износа. На рис. 5.13 показаны результаты испытаний изнашивания хромированного поршневого кольца до предельного состояния на минеральном и синтетическом маслах.

На стадии приработки скорость изнашивания постепенно снижается. Как видно из рис. 5.13, период приработки на синтетическом масле заканчивается раньше (15 тыс. км), чем на минеральном (20 тыс. км), а износ кольца за этот период значительно меньше.

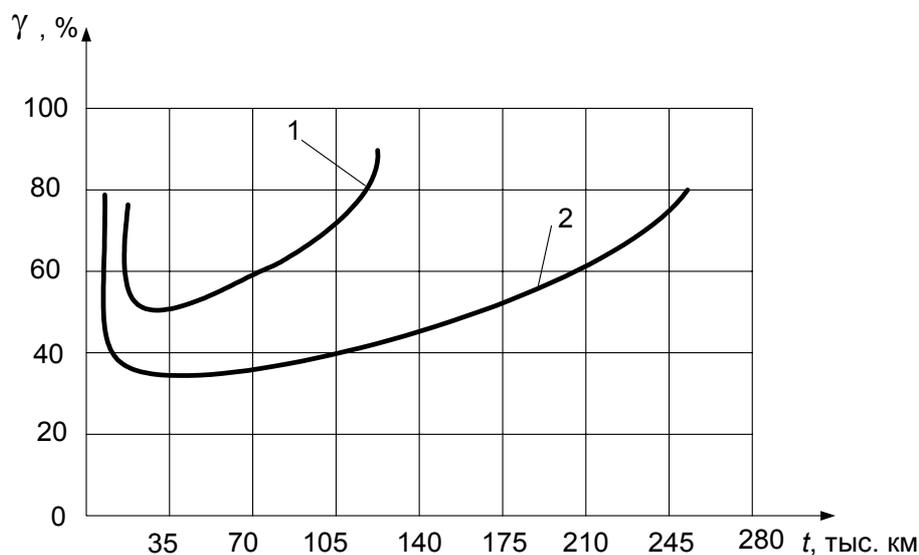


Рис. 5.13. Кривые изнашивания хромированного поршневого кольца: 1 — на минеральном масле; 2 — на синтетическом масле; γ — относительный износ, %

На стадии установившегося (нормального) изнашивания, когда детали окончательно приработались, процесс протекает с постоянной скоростью до определенной наработки (на минеральном масле до 100 тыс. км, на

синтетическом – до 250 тыс. км). На этих наработках скорость изнашивания резко возрастает, и процесс переходит в стадию аварийного износа, т.е. кольцо достигло предельного состояния. Таким образом, при работе на синтетическом масле ресурс поршневого кольца в 2,5 раза выше, чем на минеральном.

С улучшением эксплуатационных свойств масла растет степень защиты двигателя, поэтому после гарантийного пробега для снижения интенсивности изнашивания деталей можно использовать масла с более высокими эксплуатационными свойствами. Однако следует иметь в виду, что использование более качественных масел не увеличивает сроки их замен, а гарантирует только повышенную степень защиты деталей двигателя от изнашивания.

5.3.2. Организация ТО и ремонта

Основной задачей системы эксплуатации машин является поддержание их технического состояния и надежности на уровне, достаточном для осуществления ими заданных функций.

На автомобильном транспорте для решения этой задачи создана и функционирует планово-предупредительная система технического обслуживания (ТО) и ремонта, которая предусматривает три стратегии ее обеспечения:

I – поддержание заданного уровня исправности или работоспособности (ТО);

II – восстановление утраченной работоспособности (ремонт);

III – комбинация I и II стратегий (ТО и ремонт).

Техническое обслуживание представляет собой комплекс работ для поддержания исправности или только работоспособности объекта в процессе его эксплуатации, направленных на решение следующих основных задач:

– предупреждение (профилактика) отказов и неисправностей;

– снижение темпа изнашивания и отдаление момента достижения объектом предельного состояния (т.е. увеличение ресурса);

– обеспечение требуемого уровня вероятности безотказной работы.

Снижение темпа изнашивания увеличивает наработки конструктивных элементов на отказ, повышает показатели безотказности, снижает простои машин в ремонтах, в том числе и в периоды между обслуживаниями. Все это уменьшает удельные затраты на устранение отказов, уве-

личивает ресурсы машин, если даже их предельное состояние определяется не только отказами корпусных и других основных конструктивных элементов, но и снижением эффективности, затратами на устранение отказов и неисправностей.

Техническое обслуживание является профилактическим мероприятием, проводимым принудительно в плановом порядке, как правило, без разборки и снятия с автомобиля агрегатов, узлов и деталей.

Высокая эксплуатационная надежность автомобилей как главная цель, стоящая перед технической службой автотранспортных предприятий, обеспечивается решением целого ряда организационных, технических и технологических задач при проведении ежедневного (ЕО), первого (ТО-1), второго (ТО-2), сезонного (СО) обслуживаний и ремонте.

Ремонт предназначен для восстановления исправного или работоспособного состояния изделия и его элементов, а также устранения отказов и неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации. В соответствии с характером и назначением работ ремонт подразделяют на капитальный и текущий (ТР).

Капитальный ремонт предназначен для регламентированного восстановления изделий, потерявших работоспособность, до нормативного уровня. Для автотранспортных средств ресурс восстановленных изделий должен быть не менее 80 % от ресурса нового. Капитальный ремонт изделий предусматривает их полную разборку, дефектацию, восстановление или замену деталей с последующей сборкой, регулировкой и испытанием.

Агрегаты автомобилей направляют в капитальный ремонт, когда базовые и основные детали достигли предельного состояния и их работоспособность не может быть восстановлена проведением ТР. Базовые и основные детали обеспечивают выполнение функциональных свойств агрегатов и определяют их эксплуатационную надежность. Поэтому их восстановление при капитальном ремонте должно обеспечивать уровень качества, близкий или равный качеству новых изделий.

При капитальном ремонте обеспечивается также восстановление до уровня новых изделий или близкого к нему: зазоров и натягов, взаимного расположения деталей (осей, плоскостей и т.д.), микро- и макрогеометрии рабочих поверхностей, структуры и твердости металла.

Текущий ремонт предназначен для обеспечения работоспособного состояния автотранспортных средств с восстановлением или заменой отдельных агрегатов, узлов и деталей (кроме базовых), достигших предель-

ного состояния. ТР должен обеспечивать безотказную работу отремонтированных агрегатов, узлов и деталей на пробеге, не меньшем, чем до очередного ТО-2.

Для сокращения времени простоя автомобилей ТР выполняется преимущественно агрегатным методом, при котором производится замена неисправных или требующих капитального ремонта агрегатов и узлов на исправные, взятые из оборотного фонда.

Эффективность ТО и ремонта автомобилей определяется степенью выполнения заданных объемов и качества работ, ростом производительности труда, снижением затрат на поддержание подвижного состава в технически исправном состоянии. Оценка уровня качества выполнения ТО и ремонта осуществляется с помощью ряда технико-экономических показателей. В практической деятельности автотранспортных предприятий используются следующие показатели.

1. *Число заявок на текущий ремонт.* Число заявок на ТР может определяться за период между очередными ТО или за определенную наработку, например за 1000 км,

$$n_{з.р} = \frac{\sum n_{з.р} 1000}{T}, \quad (5.4)$$

где $n_{з.р}$ – число заявок на ремонт на 1000 км пробега; $\sum n_{з.р}$ – общее число заявок на ремонт (по автомобилю, агрегату, предприятию); T – общая наработка автомобиля (автомобилей) за рассматриваемый период.

2. *Нарботка на отказ (п. 1.3.1)*

$$t_{н} = \frac{T}{\sum n_{з.р}}. \quad (5.5)$$

Очевидно, чем выше уровень организации ТО и ремонта на предприятии и соответственно их качество, тем меньше число заявок на ремонт $n_{з.р}$ и больше наработка на отказ $t_{н}$.

В дополнение к этим двум показателям при более глубоком анализе качества ТО и ремонта могут использоваться число опозданий с выездом на линию и число преждевременных возвратов автомобилей с линии из-за неисправностей; число отказов автомобилей или суммарное время их простоя на линии из-за некачественного выполнения ТО и ремонта. Все эти показатели рассматриваются за определенную наработку или период времени. К показателям качества относится и величина пробега агрегатов или автомобилей до предельного состояния.

Одним из важнейших показателей качества деятельности всей технической службы АТП, обобщающим как различные условия работы автомобилей, так и разный уровень выполнения ТО и ремонта, является ко-

эффицент технической готовности автомобилей α_T . Он определяет долю рабочего времени, в течение которого автомобиль (парк) исправен и может быть использован в транспортном процессе. Величина коэффициента технической готовности определяется:

$$\text{– для одного автомобиля} \quad \alpha_T = \frac{D_э}{D_э + D_p}; \quad (5.6)$$

$$\text{– для парка автомобилей} \quad \alpha_T = \frac{AD_э}{AD_э + AD_p}, \quad (5.7)$$

где $D_э$, D_p – число дней нахождения автомобиля в эксплуатации и ремонте соответственно; A – число автомобилей в парке.

Таким образом, показатели качества ТО и ремонта оценивают безотказную работу автомобиля (агрегата, системы) в течение определенной наработки, т.е. уровнем эксплуатационной надежности обслуживаемых объектов.

5.4. Техническая диагностика машин

5.4.1. Основные понятия. Системы диагностирования

Широкий диапазон условий и режимов эксплуатации, а также вариация начальных показателей качества машины приводят к значительной дисперсии ее наработок до предельного состояния. Поэтому весьма важно иметь методы и средства для оценки технического состояния машины, т.е. получение индивидуальной информации о скрытых и назревающих отказах, остаточном ресурсе, причинах нарушения работоспособности и т.п. Средством получения такой информации является техническая диагностика.

Технической диагностикой называется отрасль знаний, изучающая признаки неисправностей машин, методы, средства и алгоритмы определения их технического состояния без разборки. Техническая диагностика непосредственно примыкает к теории надежности, так как главной ее целью является своевременное обнаружение неработоспособного состояния машины, прогнозирование остаточного ресурса, что в конечном счете направлено на повышение надежности и эффективности эксплуатации машины.

Техническая диагностика как научное направление ставит перед собой задачу изучения всего комплекса вопросов, связанных с оценкой технического состояния машины, т.е. состояния, которое характеризуется в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

Диагностированием называют процесс определения технического состояния объекта без его разборки путем измерения величин, характери-

зующих его состояние, и сопоставления их с нормативами. Диагностирование не является самостоятельным технологическим процессом, оно является элементом системы ТО и ремонта, обеспечивающим индивидуальную информацию о техническом состоянии объекта. Наличие такой информации позволяет оптимизировать режимы регламентного контроля, оперативно выявлять потребность объекта в ремонте и ТО, проверять качество их выполнения, т.е. комплексно управлять техническим состоянием.

Под управлением техническим состоянием объекта подразумевается комплекс технических воздействий, направленных на предупреждение отказов и восстановление значений параметров технического состояния до требуемого уровня (рис. 5.14).

Из схемы видно, что при эксплуатации объекта под влиянием факторов внешней среды происходит изменение его технического состояния, которое восстанавливается в процессе ТО или ремонта. Внедрение диагностирования в этот процесс позволяет уточнить объемы регламентных работ применительно к данному объекту, исключить затраты на его преждевременную профилактику и текущий ремонт, полнее использовать заложенный в него потенциальный ресурс.

Диагностирование является качественно более совершенной формой контрольных работ и отличается от последних следующими признаками:

- объективностью и достоверностью оценки технического состояния сложных объектов без их разборки;
- возможностью определения технического состояния по выходным параметрам;
- появлением условий для прогнозирования технического состояния объекта, его остаточного ресурса.

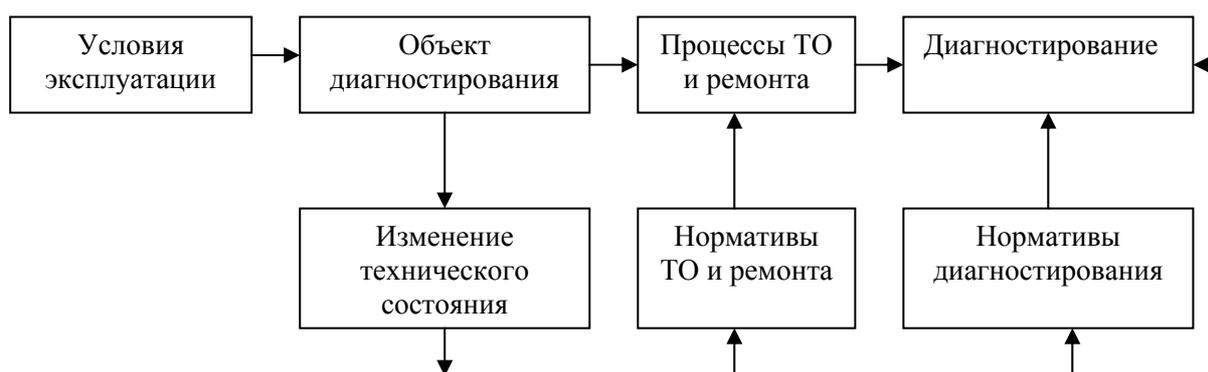


Рис. 5.14. Схема управления техническим состоянием объекта в эксплуатации

Результат диагностирования, т.е. заключение о техническом состоянии, называется *диагнозом*. При диагностировании машин возможны раз-

личные варианты формирования диагноза. В случае положительного результата диагностирования, т.е. когда объект находится в работоспособном состоянии, желательно иметь информацию о запасе его исправной работы (прогнозирование остаточного ресурса). При отрицательном результате (объект неработоспособен) – заключение о конкретных отказах и неисправностях.

В процессе диагностирования в общем случае принимают участие объект диагностирования, технические средства диагностирования и человек-оператор, которые в совокупности образуют систему диагностирования.

Функции человека-оператора изменяются в зависимости от степени автоматизации процесса диагностирования и от того, какое (рабочее или тестовое) диагностирование выполняется.

Системы диагностирования делятся на *функциональные*, когда диагностирование проводят в процессе работы объекта, и *тестовые*, когда при измерении диагностических параметров работу объекта воспроизводят искусственно. Различают системы *универсальные*, предназначенные для нескольких различных диагностических процессов, и *специальные*, обеспечивающие только один из них.

Диагностические системы могут быть *общими*, когда объектом является изделие в целом, а назначением – оценка его состояния на уровне «годно – негодно», и *локальными*, предназначенными для диагностирования составных частей объекта (агрегатов, механизмов, систем).

В зависимости от используемых технических средств системы диагностирования могут быть *автоматизированными* и *ручными*. Автоматизации прежде всего подлежат операции получения информации о техническом состоянии, ее обработка и выдача диагностического заключения (диагноза).

Средствами диагностирования (автомобиля) служат специальные приборы и стенды. Они подразделяются:

– на *внешние*, которые подсоединяются или работают с контролируемыми изделиями только во время проведения контроля и не являются элементами изделия;

– *встроенные* (бортовые), которые являются конструктивными элементами объекта и осуществляют контроль непрерывно или периодически по определенной программе.

Внешние средства диагностирования могут быть стационарными (стенды тормозные, для проверки углов установки колес и др.) и переносными (тестеры, газоанализаторы, дымомеры, компрессометры и др.).

Встроенные средства диагностирования включают в себя входящие в конструкцию автомобиля датчики и приборы (блоки питания, электронно-вычислительные приборы, индикацию) для обработки диагностических сигналов и непрерывного или достаточно частого измерения параметров технического состояния. Простейшие средства встроенного диагностирования реализуются в виде традиционных приборов щитка водителя. Более сложные средства встроенного диагностирования позволяют водителю постоянно контролировать состояние тормозных систем, расход топлива, токсичность отработанных газов и др.

Недостатком сложных средств встроенного диагностирования является необходимость оборудования каждого автомобиля дорогостоящей аппаратурой.

Существуют диагностические средства смешанного типа. В таких комплексах используют встроенные датчики с выводами диагностического сигнала к централизованному штепсельному разъему и внешние средства для снятия электрических сигналов, их измерения, обработки и индикации полученной информации.

Любая система диагностирования предполагает установление закономерностей изменения параметров технического состояния объекта, обоснование комплекса диагностических параметров и их нормативных значений, выявление связей этих параметров с параметрами технического состояния, определение оптимальной процедуры (алгоритма) диагностирования.

Алгоритм диагностирования представляет собой структурное изображение рациональной последовательности диагностических, регулировочных и ремонтных операций. Он определяет вывод объекта на тестовый режим, постановку первичного диагноза, переход к следующему элементу, регулировочные и ремонтные операции, повторные и заключительные проверки. Алгоритм строят с учетом особенностей объекта и средств диагностирования и оптимизируют (сравнивая с другими вариантами) по экономическому критерию.

Окончательную детализацию процедуры диагностирования дает *технологическая карта*, которая включает в себя порядковые номера опе-

раций и их трудоемкость, применяемое оборудование, исполнителей, коэффициенты повторяемости.

5.4.2. Выбор диагностических параметров

Техническое состояние машин (агрегатов, узлов) определяется, безусловно, структурными параметрами, однако в большинстве случаев невозможно осуществить их контроль без разборки. Поэтому для этой цели используют *диагностические параметры* – косвенные величины, связанные со структурными параметрами и несущие достаточную информацию о техническом состоянии объекта.

В качестве диагностических параметров при оценке технического состояния автомобилей используют:

- параметры рабочих процессов (мощность, тормозной путь, расход топлива и т.д.);
- параметры сопутствующих процессов (вибрации, шумы, нагрев и т.п.);
- геометрические параметры (зазоры, свободный ход, люфты, несоосности и др.).

В основу выбора диагностических параметров должны быть положены технические, экономические или технико-экономические критерии. К техническим критериям относят срок службы объекта до предельного состояния, уровень безотказной работы, коэффициент технической готовности, информативность, точность, контролепригодность и др. Экономические критерии определяют максимум производительности или рентабельности эксплуатации. Предпочтительными являются технико-экономические критерии в виде минимизации суммарных приведенных затрат или суммарных удельных затрат на эксплуатацию, ТО и ремонт. Выбор диагностических параметров S определяется их взаимосвязью со структурными параметрами X (рис. 5.15).

Эти связи могут быть единичными (рис. 5.15, а), когда с изменением конкретного структурного параметра изменяется один диагностический; множественными (рис. 5.15, б), когда изменение одного структурного параметра ведет к изменению нескольких диагностических; неопределенными (рис. 5.15, в), когда один диагностический параметр может изменяться при изменении нескольких структурных; комбинированными (рис. 5.15, г), когда возможны комбинации вышеперечисленных связей.

Из всего комплекса диагностических параметров выбираются лишь те, которые удовлетворяют требованиям однозначности, стабильности, чувствительности, информативности и технологичности.

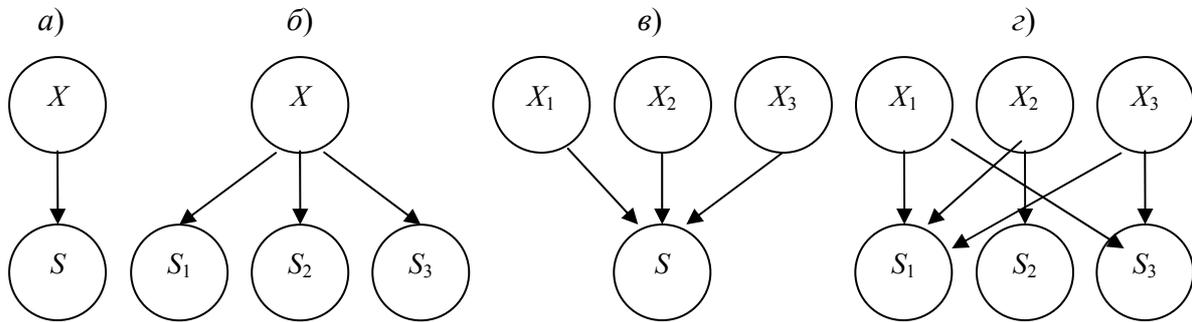


Рис. 5.15. Взаимосвязи диагностических и структурных параметров

Под *однозначностью* понимают соответствие каждому значению диагностического параметра только одного состояния диагностируемого объекта, т.е. в диапазоне от начального до предельного значений структурного параметра экстремум функции $S = f(X)$ отсутствует.

Стабильность диагностического параметра определяется наибольшим отклонением его величины от среднего значения при неизменных условиях измерения.

Чувствительность ϕ диагностического параметра характеризуется изменением его значения dS с изменением ΔX структурного параметра. Для практических целей можно пользоваться приращениями $\Delta S = f(\Delta X)$.

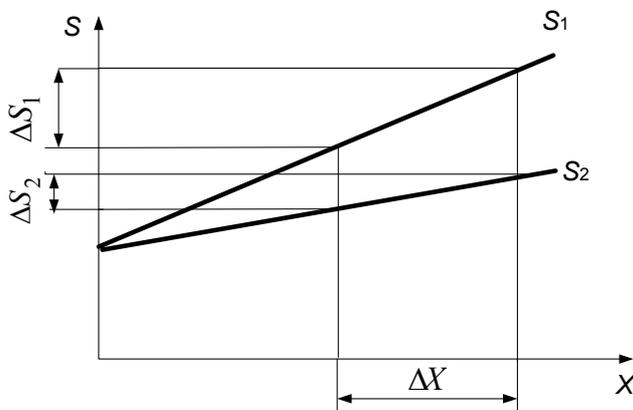


Рис. 5.16. Схема определения чувствительности диагностических параметров

Из рис. 5.16 следует, что при $\Delta X = \text{const}$ $\Delta S_1 > \Delta S_2$, тогда и чувствительность диагностического параметра S_1 больше чувствительности параметра S_2 , т.е. $\phi_1 > \phi_2$.

Информативность диагностического параметра определяется снижением исходной энтропии (т.е. неопределенности технического состояния объекта) после измерения данного диагностического параметра

$$I = H_n - H_i, \quad (5.8)$$

где H_n, H_i – неопределенность (энтропия) состояния объекта до и после измерения i -го диагностического параметра.

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.

Процедура выбора диагностических параметров предусматривает следующие этапы:

- анализ статистических данных по эксплуатационным отказам и неисправностям с целью выявления наименее надежных составных частей и наиболее часто повторяющихся неисправностей;
- выявление структурно-следственных связей диагностируемого объекта;
- разработку методики поиска неисправностей и алгоритма диагностирования.

Первый этап подробно рассмотрен в четвертой главе данного пособия.

Кроме закономерностей изменения технического состояния механизмов и узлов объекта диагностирования необходимо обобщенное описание его наиболее важных свойств: перечень наиболее часто отказывающихся элементов, соответствующие этим элементам структурные и диагностические параметры и связи между ними. Наиболее простое логическое описание объекта диагностирования выражается его структурно-следственной моделью, разработка которой осуществляется по принципу многоуровневой цепочки, которая определяет следующие уровни поиска неисправности:

- 1 – основные узлы, из которых состоит диагностируемая система;
- 2 – сопряжения и элементы узлов, имеющих в процессе эксплуатации наибольшие износы и отклонения структурных параметров;
- 3 – структурные параметры сопряжений и элементов, определяемые на основе анализа взаимодействия элементов и сопряжений с учетом показателей эксплуатационной надежности;
- 4 – перечень возможных неисправностей объекта;
- 5 – перечень симптомов, посредством которых проявляется каждая неисправность;
- 6 – предварительный перечень всех возможных диагностических параметров, из которых выбираются только удовлетворяющие вышеизложенным требованиям.

На рис. 5.17 представлена структурно-следственная модель связей системы подвески и рулевого управления переднеприводного автомобиля семейства ВАЗ.

Для повышения эффективности процесса диагностирования следует из всех возможных проверок проводить только необходимые и в совершенно определенной последовательности по алгоритму. Строить диагностический процесс целесообразно как некоторую процедуру, в результате которой не только оцениваются значения параметров, но и происходит управление сбором информации.

Алгоритм диагностирования должен быть построен таким образом, чтобы по выбранному перечню параметров определить работоспособность системы и локализовать имеющиеся неисправности.

Локализация неисправностей, т.е. их поиск и устранение, является неотъемлемой частью технологического процесса диагностирования. Основные метрологические требования, которым должны удовлетворять методы и средства локализации неисправностей, не отличаются от требований к самому процессу диагностирования. К ним относятся точность, достоверность, быстрдействие и эффективность.

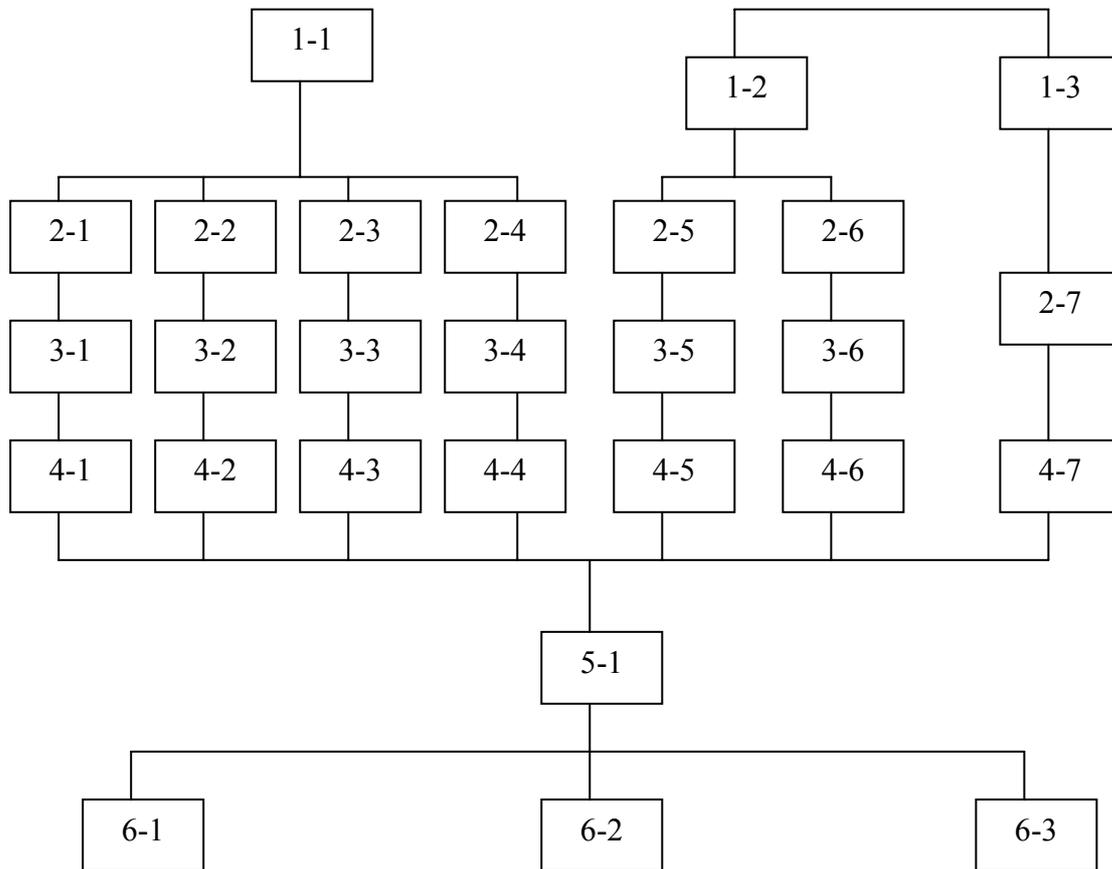


Рис. 2.4. Блок-схема структурно-следственных связей системы подвески и рулевого управления переднеприводного автомобиля семейства ВАЗ:

1-1 – передняя подвеска автомобиля; 1-2, 1-3 – рулевое управление автомобиля, состоящее из рулевого привода и рулевого механизма; 2-1 – ступичный подшипник – корпус ступицы колеса; 2-2 – рычаги подвески; 2-3 – шаровой шарнир рычага подвески; 2-4 – растяжки рычагов подвески; 2-5 – рулевые тяги; 2-6 – наконечники рулевых тяг; 2-7 – рейка – приводная шестерня рулевого механизма; 3-1 – увеличенный зазор в ступичном подшипнике; 3-2 – изменение длины (конфигурации) рычагов подвески; 3-3 – изменение длины рулевых тяг; 3-4 – люфт в шаровых шарнирах рулевых тяг; 3-5 – изменение длины рулевых тяг; 3-6 – люфт в шаровых шарнирах рулевых тяг; 3-7 – увеличенный зазор в рулевом механизме; 4-1 – механический износ поверхностей ступичного подшипника; 4-2 – деформация рычагов подвески; 4-3 – механический износ шарового пальца или ослабление пружины шаровой опоры рычага подвески; 4-4 – деформация растяжек подвески; 4-5 – деформация рулевых тяг; 4-6 – механический износ шарового пальца или ослабление пружины шарового шарнира рулевой тяги; 4-7 – механический износ рейки и приводной шестерни рулевого механизма; 5-1 – нарушение устойчивости и управляемости автомобиля; 6-1 – эффективность подвески; 6-2 – отклонение углов установки колес; 6-3 – боковой увод автомобиля

Параметры шестого уровня, как это следует из рис. 5.17, позволяют оценить устойчивость и управляемость автомобиля и указывают на конкретную неисправность.

5.4.3. 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 S_n , предельное S_p и допустимое S_d значения.

Номинальное значение параметра соответствует новым, технически исправным машинам, агрегатам, узлам. Предельное значение параметра соответствует такому состоянию объекта, когда его дальнейшая эксплуатация становится технически невозможной или экономически невыгодной. Допустимое значение представляет собой ужесточенную величину предельного, при которой обеспечивается заданный уровень безотказной работы на межконтрольной наработке.

В общем случае для определения нормативных значений диагностических параметров используют три метода:

- метод назначения предельного значения на основе толерантных границ (при ограниченной статистической информации);
- метод определения допустимого значения по матрице переходных вероятностей (изменение диагностического параметра по наработке носит стохастический, непрогнозируемый характер);
- метод определения нормативных значений диагностического параметра по его связи со структурным параметром.

Применение каждого из этих методов обусловливается информацией о реализациях диагностических параметров и о характере их связей с показателями работоспособности агрегата. Наибольшее распространение для диагностирования автотранспортных средств получил третий метод. Он предполагает определение нормативных значений диагностических параметров по их связям со структурными параметрами при минимизации удельных затрат на эксплуатацию, ТО и ремонт с учетом точности измерения параметра.

Формирование нормативных значений диагностического параметра при известной закономерности его изменения может быть представлено схемой (рис. 5.18).

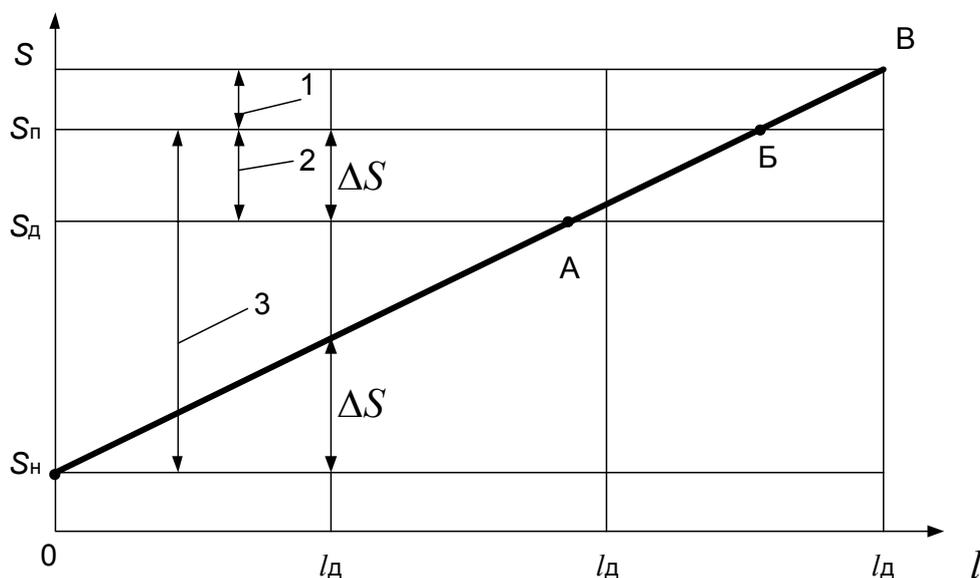


Рис. 5.18. Схема формирования диагностических нормативов при линейной реализации диагностического параметра S :
 1 – запас предотказного состояния; 2 – запас исправного состояния;
 3 – общий запас исправной работы; А – профилактика (упреждение неисправности); Б – неисправность (упреждение отказа); В – отказ;
 l_d – периодичность диагностирования

Начальный норматив S_n определяет исходное состояние объекта. 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.

Предельный норматив S_n устанавливают по техническим или технико-экономическим критериям, которые определяют возникновение отказа (неисправности) или экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Диагностические нормативы можно подразделить на две группы: устанавливаемые ГОСТами или рекомендуемые отраслевой технической документацией (например ТУ заводов-изготовителей).

Нормативы, устанавливаемые ГОСТами, подлежат строгому соблюдению и их индивидуальная корректировка возможна только в сторону ужесточения. К этой группе относятся в основном параметры для диагностирования узлов, непосредственно влияющих на безопасность автомоби-

ля, в том числе и экологическую (нормативы эффективности торможения, люфт рулевого колеса, содержание СО в отработавших газах и другие обязательные параметры).

Диагностические параметры, устанавливаемые отраслевой технической документацией, связаны с технологическими допусками структурных параметров на изготовление механизма, а также с показателями надежности и экономичности их работы (зазоры в различных сопряжениях, углы установки колес, люфты и т.д.). Нормативные значения диагностических параметров этого вида устанавливают на основании исследований их функциональных связей с нормативными значениями структурных параметров.

Среди диагностических параметров как 1-й, так и 2-й групп имеются нормативы, несоблюдение которых приводит к дополнительным эксплуатационным затратам (повышению расхода топлива, затрат на ремонты из-за уменьшения долговечности и безотказности узлов, снижению мощности двигателя и др.). Нормативные значения этих показателей из-за различий в условиях эксплуатации не могут быть одинаковыми. Поэтому их определение осуществляют дифференцированно для конкретных условий эксплуатации с помощью статистического метода, учитывающего закономерности изменения технического состояния объекта.

Сущность метода заключается в том, что по результатам обследования представительной партии автомобилей строят гистограмму распределения значений диагностического параметра и аппроксимирующую ее теоретическую кривую. Допускается, что полученное распределение содержит только те параметры, которые принадлежат исправным объектам. Значения же параметров, принадлежащих неисправным объектам, выйдут за пределы этого распределения.

Диагностические параметры, наиболее удаленные от номинального или среднего значения и принадлежащие полученному распределению, можно отнести к предельным. Однако следует иметь в виду, что эти крайние значения диагностических параметров могут соответствовать как исправному, так и неисправному состоянию объекта. Поэтому по аналогии с принятой в теории надежности методикой область рассеивания диагностического параметра ограничивают пределами, соответствующими требуемому уровню вероятности исправной работы. Такое ограничение выбирают с учетом ошибок I и II рода, возможных при диагностировании.

Ошибка I рода (ложная неисправность) – это признание механизма неисправным, тогда как на самом деле он еще в исправном состоянии. Ошибка II рода (пропуск неисправности) – это признание механизма исправным, когда фактически он находится в неисправном состоянии.

Практика эксплуатации автомобилей показывает, что все значения диагностического параметра, находящиеся в пределах рассеивания $S_{п0,85}$, ограниченном уровнем вероятности $P \leq 0,85$, соответствуют исправному состоянию (рис. 5.19). Ошибка II рода (пропуск неисправности) при этом будет минимальна.

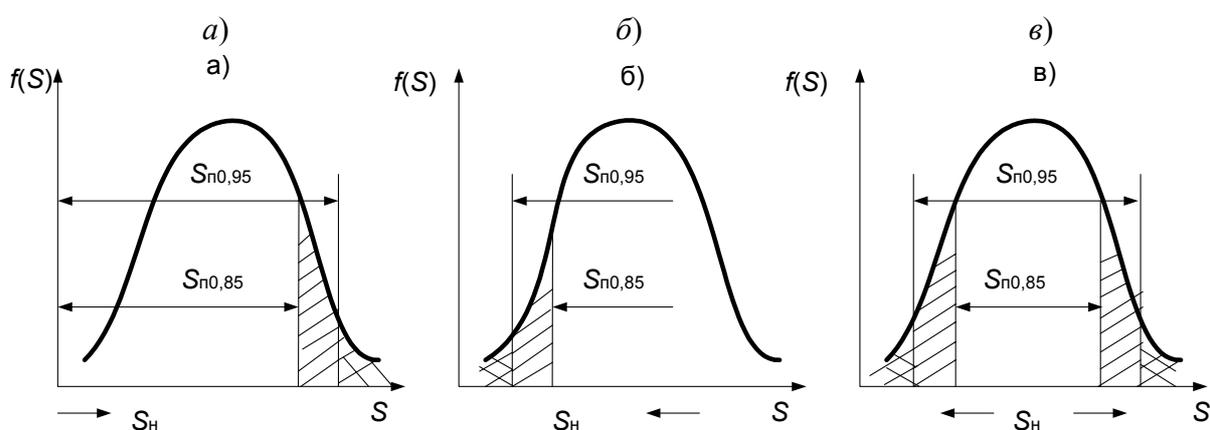


Рис. 5.19. Схема определения предельных значений диагностических параметров

Значения параметра, выходящие за пределы рассеивания $S_{п0,95}$, ограниченного уровнем вероятности $P \geq 0,95$, соответствуют неисправному состоянию и минимальному значению ошибки I рода.

Значения параметра внутри диапазона $S_{п0,85} - S_{п0,95}$ будут соответствовать как исправному, так и неисправному состоянию. Вероятности обоих состояний при этом можно считать одинаковыми, т.е. ошибки I и II рода составят примерно 5 %.

Предельные нормативы для наиболее ответственных механизмов (например непосредственно влияющих на безопасность движения), ошибки II рода для которых должны быть минимальными, ограничиваются более жестким 85%-м уровнем вероятности. Для остальных механизмов из экономических соображений указанное ограничение менее жесткое – 95 %.

В зависимости от закономерностей изменения диагностического параметра его рассеивание может быть ограничено с одной (рис. 5.19, а, б) или с двух сторон (рис. 5.19, в).

Зная закон распределения диагностического параметра и принятый уровень вероятности P (0,85 или 0,95), определяют его предельные нормативы. Для нормального закона, например при двухстороннем ограничении, они составят

$$S_{п0,85} = S_{cp} \pm 1,5\sqrt{D_s}; \quad S_{п0,95} = S_{cp} \pm 2,0\sqrt{D_s}, \quad (5.9)$$

где D_s – дисперсия распределения диагностического параметра.

При одностороннем (верхнем) ограничении предельные нормативы равны

$$S_{п0,85} = S_{cp} + \sqrt{D_s}; \quad S_{п0,95} = S_{cp} + 1,7\sqrt{D_s}. \quad (5.10)$$

При монотонном изменении параметра в качестве нормативных показателей целесообразно использовать не предельное $S_{п}$, а допустимое $S_{д}$ значение параметра. *Допустимый диагностический норматив* представляет собой ужесточенную величину предельного норматива, которая обеспечивает исправную работу механизма на межконтрольном пробеге. Он является основным нормативом при постоянной периодичности диагностирования, когда известна закономерность изменения диагностического параметра данного объекта. Предположим, что функция изменения диагностического параметра имеет вид

$$S = S_{н} + vl^{\alpha}, \quad (5.11)$$

где $S_{н}$ – начальное значение параметра; v – интенсивность изменения параметра; l – наработка; α – показатель степени, определяющий характер изменения параметра.

Тогда, зная межконтрольный пробег $l_{д}$, величину предельного норматива $S_{п}$ и скорость изменения параметра v , значение допустимого норматива определяют по формуле

$$S_{д} = v \left(\sqrt[\alpha]{\frac{S_{п}}{v}} - l_{д} \right). \quad (5.12)$$

5.4.4. Прогнозирование остаточного ресурса машин

Одной из основных задач диагностирования является прогнозирование остаточного ресурса объекта, под которым понимают определение продолжительности его исправной работы до возникновения предельного состояния. Учитывая то, что диагностирование автомобилей проводят в основном периодически по плану, задача прогнозирования заключается в определении возможности их исправной работы до очередного ТО. Прак-

тически прогнозирование заключается в определении оптимальной периодичности диагностирования и допустимых диагностических нормативов.

В основе определения оптимальной периодичности диагностирования агрегата, узла, как и обоснования регламентной периодичности технического обслуживания, лежат закономерности изменения их технического состояния и экономические показатели (удельные затраты на поддержание работоспособного состояния).

Обосновав оптимальную периодичность диагностирования l_d каждого механизма, приурочивают их к плановой периодичности соответствующего вида технического обслуживания l_p .

Определение периодичности диагностирования при оценке технического состояния автомобиля можно осуществлять несколькими методами в зависимости от выбранного критерия оптимизации.

Метод определения периодичности диагностирования по допустимому уровню вероятности безотказной работы (рис. 5.20)

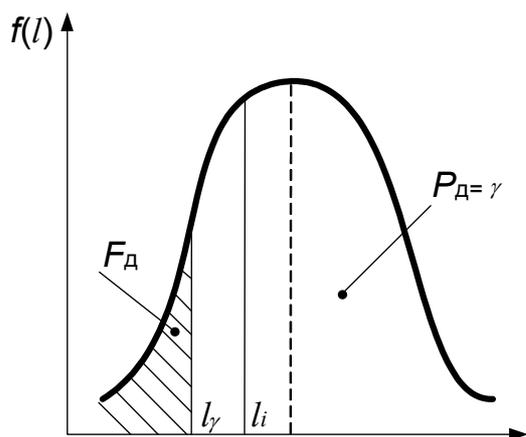


Рис. 5.20. Схема определения оптимальной периодичности диагностирования по допустимой вероятности безотказной работы

Метод основан на выборе такой периодичности диагностирования l_d , при которой вероятность отказа не превышает установленной величины F_d . Для обеспечения безотказной работы объекта должно выполняться условие

$$P(l_i \geq l_\gamma) \geq P_d = \gamma, \quad (5.13)$$

где l_i – наработка объекта на отказ; γ – допустимый уровень вероятности безотказной работы; l_γ – наработка, соответствующая оптимальной периодичности l_d .

Оптимальное значение периодичности l_d определяют из выражения

$$F_d = 1 - P_d = \int_0^{l_d} f(l) dl. \quad (5.14)$$

Допустимый уровень безотказной работы принимают равным $P_d = 0,95$ для узлов и систем, обеспечивающих безопасность движения автомобиля, и $P_d = 0,85 - 0,90$ – для прочих элементов.

Несмотря на простоту использования, метод обладает существенным недостатком. При значительных вариациях изменения технического состояния он не может обеспечить необходимую точность и эффективность оценки технического состояния объекта диагностирования.

Определение периодичности диагностирования по частной реализации диагностического параметра

Метод предполагает наличие функции изменения диагностического параметра по наработке от начального S_n до предельного $S_{п}$ значений (5.11). Пользуясь этой функцией, можно определить полный $l_{д}$ и остаточный l_o ресурсы диагностируемого механизма после некоторой наработки l_i (рис. 5.21):

$$l_{п} = \alpha \sqrt{\frac{|S_{п} - S_{н}|}{v}}; \quad (5.15)$$

$$l_o = l_i \left(\alpha \sqrt{\frac{|S_{п} - S_{н}|}{|S_i - S_n|}} - 1 \right), \quad (5.16)$$

где S_i – значение диагностического параметра после наработки l_i .

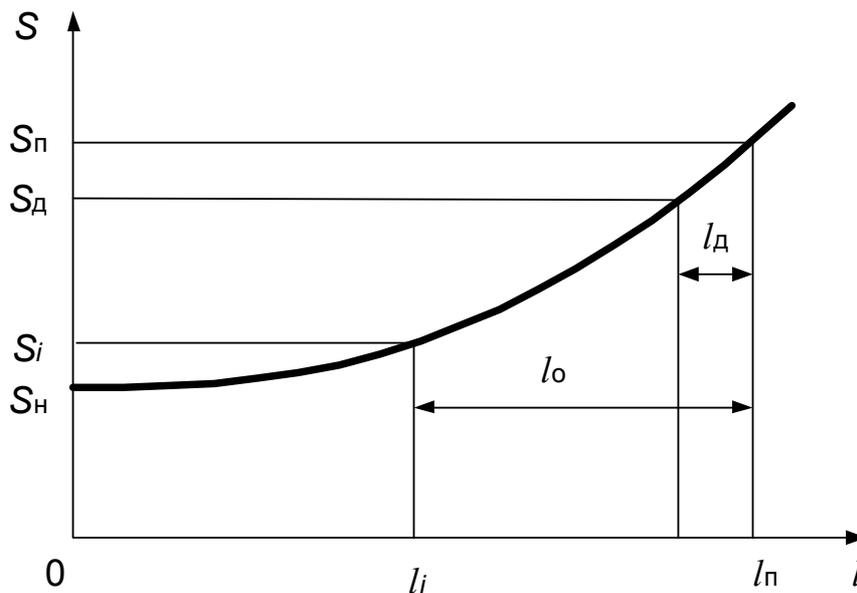


Рис. 5.21. Схема определения периодичности диагностирования по частной реализации диагностического параметра

В случае, когда диагностирование выполняют при проведении планового ТО, т.е. когда $l_{д} = l_{р}$, прогнозирование исправной работы автомобиля осуществляют сравнением остаточного ресурса l_o и периодичности $l_{р}$.

Если $l_0 > l_p$, состояние диагностируемого механизма обеспечит его исправную работу до очередного ТО. В случае, если $l_0 < l_p$, возникает необходимость в проведении ремонта. Процедуру прогнозирования можно упростить, заменив предельный диагностический норматив S_n допустимым S_d . Для этого ужесточают значение S_n на величину приращения диагностического параметра за период l_p .

Определение периодичности диагностирования по технико-экономическим показателям с учетом вероятности безотказной работы агрегата

Метод предполагает разбивку кривой изменения вероятности безотказной работы на линейные участки АБ, БВ и т.д. (рис. 5.22). В этом случае интенсивность изменения вероятности безотказной работы $P(l)$ на каждом участке постоянна.

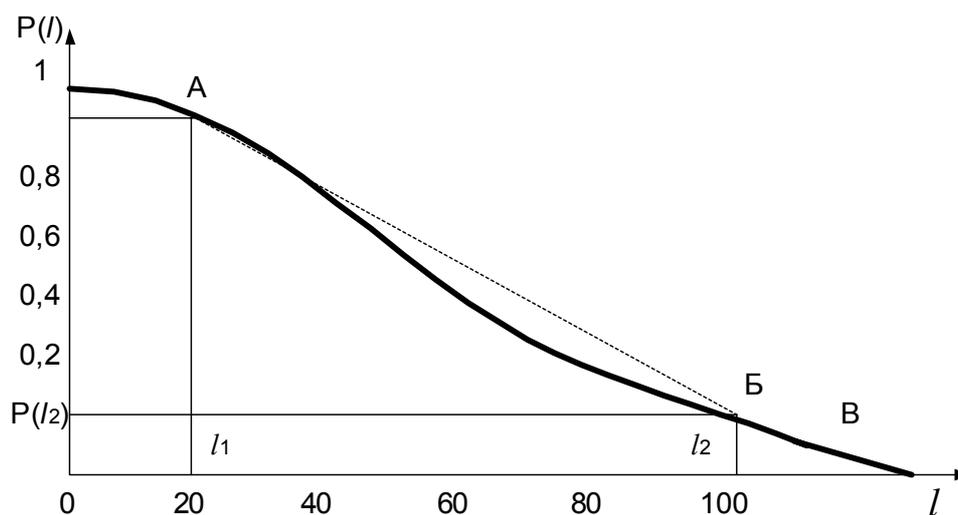


Рис. 5.22. Изменение вероятности безотказной работы диагностируемого объекта $P(l)$ по наработке l

Суть технико-экономического метода заключается в определении суммарных затрат на поддержание работоспособности объекта с учетом изменения вероятности его безотказной работы и последующей их минимизации. Общие затраты на эксплуатацию диагностируемого агрегата определяют по формуле

$$C_{\Sigma} = C_o + C_{п.р} + C_{а.р} + C_{н.р} + C_d, \quad (5.17)$$

где C_o , $C_{п.р}$, $C_{а.р}$, C_d – затраты на обслуживание, плановые ремонты, аварийные ремонты, диагностирование; $C_{н.р}$ – затраты, связанные с несвоевременностью замены узлов (недоработкой ресурса).

Периодичность диагностирования определяется на участке АБ, соответствующем интервалу наработки от l_1 до l_2 и снижению вероятности безотказной работы от $P(l_1)$ до $P(l_2)$. Функция C_Σ является целевой функцией, в связи с чем ее экстремальное значение соответствует оптимальному решению.

В инженерной практике определение минимума целевой функции C_Σ , а следовательно, оптимального значения периодичности диагностирования l_d чаще выполняют графически (рис. 5.23).

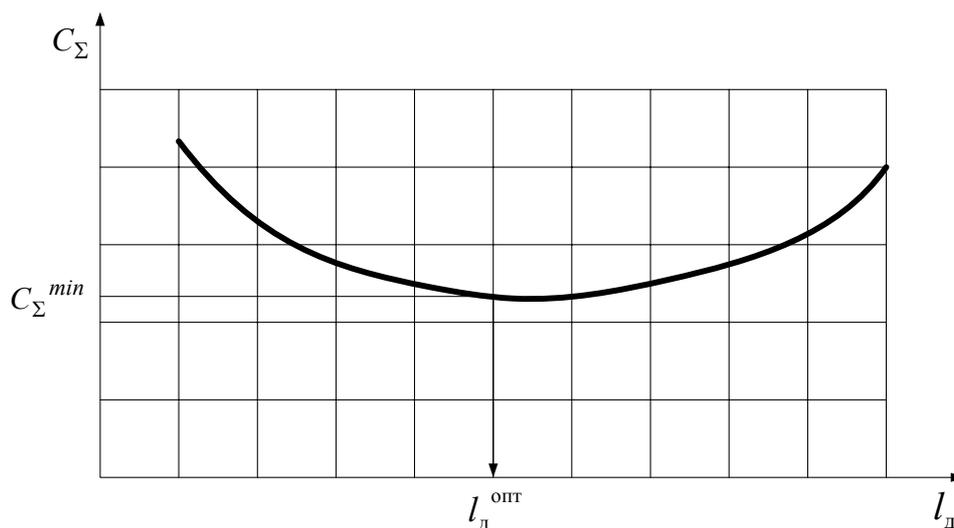


Рис. 5.23. Схема определения оптимальной периодичности диагностирования технико-экономическим методом

При определении $l_d^{\text{опт}}$ можно выполнить и аналитическую минимизацию функции C_Σ , если известны реализации всех составляющих выражения (5.17). Вычисления проводят дифференцированием целевой функции C_Σ по наработке l . Решение этого уравнения позволяет определить искомую оптимальную периодичность диагностирования конкретного объекта $l_d^{\text{опт}}$.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные конструктивные методы обеспечения надежности машин.
2. Какие требования предъявляют к материалам деталей, используемым в парах трения?
3. Какие требования обеспечения ремонтпригодности предъявляют к современным автомобилям?
4. С какой целью используют резервирование элементов и систем автомобиля?
5. Перечислите наиболее важные технологические мероприятия повышения надежности автотранспортных средств.

6. Какие методы упрочнения рабочих поверхностей используют в современном автомобилестроении?
7. Какие факторы оказывают влияние на показатели надежности автомобилей в эксплуатации?
8. Что понимают под «технической диагностикой» и «диагностированием» автомобилей?
9. Назовите основные требования к выбору диагностических параметров.
10. Какие методы используют при нормировании диагностических параметров?
11. Что понимают под прогнозированием остаточного ресурса машин?
12. Перечислите методы определения оптимальной периодичности диагностирования автомобилей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение высокого уровня надежности машин является одной из важнейших задач машиностроения. Решение этой задачи возможно только в результате комплекса взаимосвязанных мероприятий на всех стадиях жизненного цикла машин «научные исследования – проектирование – изготовление – эксплуатация». В учебном пособии систематизированы и представлены материалы, соответствующие современному состоянию теории надежности машин, необходимые при изучении данной учебной дисциплины.

Несмотря на успехи, достигнутые в последние годы в решении проблем повышения надёжности, многие из них ещё недостаточно изучены. Следует шире использовать достижения инженерно-физических наук, изучающих физику отказов, возможности ЭВМ при расчетах и прогнозировании надёжности изделий конкретных типов, разработки, связанные с созданием комплексных систем обеспечения надёжности.

Одним из направлений повышения надёжности является разработка и обоснование рациональной номенклатуры показателей надёжности и их нормативных значений для конкретных категорий машин с учетом их специфики, заданных режимов и условий эксплуатации. Научное обоснование нормативов имеет большое значение в системе управления надёжности. Показатели надёжности при этом необходимо нормировать уже на стадии разработки технического задания, уточняя их при проектировании и конструировании машин.

Существенным резервом в решении проблемы надёжности является разработка системы информации о её реальном уровне из сферы эксплуатации. Необходимо создание специальной системы информации, оценивающей потенциальные возможности изделий по надёжности, о степени

повреждения их элементов и т.д. Это позволит обоснованно устанавливать основные показатели надёжности машин и агрегатов.

При подготовке материалов для издания по данным дисциплинам автор планирует более подробно рассмотреть перечисленные выше направления повышения надёжности машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдонькин, Ф. Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей : учеб. пособие для вузов / Ф. Н. Авдонькин. – М. : Транспорт, 1985. – 216 с.

2. Аринин, И. Н. Техническая эксплуатация автомобилей / И. Н. Аринин, С. И. Коновалов, Ю. В. Баженов. – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 315 с. – (Серия «Высшее профессиональное образование»). – ISBN 5-222-05-101-3.

3. Безверхний, С. Ф. Основы технологии полигонных испытаний и сертификация автомобилей / С. Ф. Безверхний, Н. Н. Яценко. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 600 с. – ISBN 5-7050-460-5.

4. Гмурман, В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 1975. – 333 с.

5. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введен 01.07.90. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 38 с.

6. Гурвич, И. Б. Эксплуатационная надёжность автомобильных двигателей / И. Б. Гурвич, П. Э. Сыркин. – М. : Транспорт, 1984. – 141 с.

7. Емелин, М. И. Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации / М. И. Емелин, А. А. Герасименко. – М. : Машиностроение, 1980. – 224 с.

8. Завадский, В. Ю. Статистическая обработка эксперимента в задачах автомобильного транспорта : учеб. пособие / В. Ю. Завадский ; МАДИ. – М., 1982. – 136 с.

9. Зорин, В. А. Основы работоспособности технических систем : учеб. для вузов / В. А. Зорин. – М. : Магистр-Пресс, 2005. – 536 с. – ISBN 5-902048-51-6.

10. Кубарев, А. И. Надёжность в машиностроении / А. И. Кубарев. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 224 с. – ISBN 5-7050-006-5.

11. Кугель, Р. В. Испытания на надёжность машин и их элементов / Р. В. Кугель. – М. : Машиностроение, 1982. – 181 с.

12. Кузьмин, Н. А. Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации : учеб. пособие / Н. А. Кузьмин ; Нижегород. гос. ун-т. – Н. Новгород, 2002. – 142 с. – ISBN 5-93272-123-5.

13. Купцова, Г. К. Обработка информации о надежности машин. Алгоритмы и расчеты : учеб. пособие / Г. К. Купцова, В. И. Купцов, Ф. Ю. Керимов ; МАДИ – М., 1981. – 88 с.
14. Мирошников, Л. В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях : учеб. пособие для вузов / Л. В. Мирошников, А. П. Болдин, В. И. Пал. – М. : Транспорт, 1977. – 263 с.
15. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 532 с.
16. Российская автотранспортная энциклопедия : в 3 т. Т. 3. Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт автотранспортных средств : справ. и науч.-практ. пособие. – М. : РООИП, 2000. – 456 с.
17. Ротенберг, Р. В. Основы надежности системы водитель – автомобиль – дорога – среда / Р. В. Ротенберг. – М. : Транспорт, 1986. – 215 с.
18. Надежность в машиностроении : справочник / под общ. ред. В. В. Шашкина и Г. П. Карзова. – СПб. : Политехника, 1992. – 719 с. – ISBN 5-7325-0186-X.
19. Техническая эксплуатация автомобилей : учеб. для вузов / под ред. Е. С. Кузнецова. – М. : Наука, 2001. – 535 с. – ISBN 5-02-002593-3.
20. Шейнин, А. М. Основные принципы управления надежностью машин в эксплуатации / А. М. Шейнин. – М. : Знание, 1977. – 44 с.

Учебное издание

БАЖЕНОВ Юрий Васильевич

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Учебное пособие

Редактор Е.А. Амирсейидова

Технический редактор Н.В. Тупицына

Корректор В.В. Гурова

Компьютерный набор М.А. Перевозниковой

Компьютерная верстка С.В. Павлухиной

ЛР № 020275. Подписано в печать 30.03.06.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать на ризографе. Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 9,88. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.