

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Иркутский государственный аграрный университет
им. А.А. Ежевского**

**Кафедра «Эксплуатация машинно - тракторного парка,
безопасность жизнедеятельности и профессиональное обучение»**

П.И. Ильин

**ОСНОВЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебное пособие
для студентов инженерного факультета
направления подготовки 23.03.03 Эксплуатация
транспортно - технологических машин и комплексов,
35.04.06 Агроинженерия**

Молодёжный, 2020

УДК 658.58 + 629.3.017 + 625.08(075)

Рекомендовано к изданию учебно - методической комиссией инженерного факультета Иркутского ГАУ (протокол № 9 от «21» мая 2020 г.)

Рецензент:

Бураев М.К. – заведующий кафедрой «Технический сервис и общеинженерные дисциплины», д.т.н., профессор

В учебном пособии рассмотрены общие вопросы обеспечения, поддержания и восстановления работоспособного состояния технических систем. Приведены сведения о специфической терминологии науки о надёжности машин, а также характеристики основных законов распределения ресурсов элементов машин.

Для студентов направлений подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно - технологических машин и комплексов», 35.04.06 Агроинженерия, изучающих дисциплины «Основы работоспособности технических систем», «Экспертная оценка технического состояния машин в АПК». / Составитель: П.И. Ильин – Молодёжный : Изд - во Иркутского ГАУ, 2020. - 65 с. – Текст : электронный.

© П.И. Ильин, 2020

© Иркутский ГАУ им. А.А. Ежовского, 2020

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение эффективности технических систем различного назначения способствует ускоренному прогрессу техники и технологии в разнообразных сферах их применения. Используемые технические системы достаточно сложны по своей конструкции, показатели эксплуатационного фона весьма разнообразны и имеют случайный характер. В связи с этим, обеспечение работоспособности технических систем, их безопасной и эффективной эксплуатации становится всё более значимым.

Установление причин потери работоспособности, её поддержание на всех этапах эксплуатации технических систем, восстановление работоспособного состояния в случае его потери – вот круг задач персонала, осуществляющего технический сервис. Подготовка высококвалифицированного персонала для служб технического сервиса занимает достаточно длительное время, требует использования современных технологий обучения. Однако и традиционные методы, ориентированные на самостоятельную работу с книгой, в большинстве случаев достаточно эффективны.

В учебном пособии использованы материалы исследований в области разработки и совершенствования систем поддержания и восстановления работоспособного состояния машин.

ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность принято определять как состояние объекта или системы, при котором они способны выполнять заданные функции с параметрами, установленными нормативно - технической документацией.

При анализе работоспособности машин, для наиболее полного учёта влияния многочисленных факторов, необходимо применять так называемый системный подход. С этой целью любые сопряжения, сборочные единицы и машины в целом рассматривают как *технические системы*. Кроме этого, к категории технических систем относят и формируемые для производства каких - либо работ комплекты, механизированные комплексы и парки машин.

Известными советскими учеными А.М. Шейниным, Е.С. Кузнецовым, Д.П. Волковым и другими были разработаны и развиты методы управления долговечностью и безотказностью машин в эксплуатации. Они основаны на анализе статистических данных об отказах сборочных единиц. При этом учитываются затраты на обеспечение их работоспособного состояния.

Комплексной проблемой современного этапа развития теории надёжности является обеспечение требуемой долговечности и безотказности технических систем. Основой данного этапа должен являться анализ физической сущности и закономерностей изменения процессов, происходящих в элементах технических систем за период эксплуатации. Разрешение этой проблемы требует проведения ряда организационно - технических мероприятий при проектировании, производстве и эксплуатации технических систем. Не случайным является характер развития исследований долговечности и работоспособности машин – от статистического описания надёжности к анализу физических процессов, происходящих при их эксплуатации. Он объясняется действием закона перехода количественных изменений в изменения качественные. Первые этапы развития исследований, направленные на обеспечение надёжности изделий машиностроения, были связаны с накоплением статистической информации, её обобщением и анализом. Процессы изменения

технического состояния машин очень сложны. Инженерные методы и приборы для регистрации этих процессов отсутствовали, поэтому в ходе исследований ограничивались сбором статистической информации об отказах и неисправностях сборочных единиц. Таким образом, исследования надёжности машин велись на макроуровне, без учёта процессов, которые вызывают изменение технического состояния основных элементов, сборочных единиц и машин в целом. Это обеспечило получение количественной оценки долговечности машин без учёта характера и уровня снижения их работоспособности. Современные методы физических исследований и созданное экспериментальное оборудование позволяют не только регистрировать процессы изменения технического состояния элементов машин, но и давать оценку влияния основных эксплуатационных факторов на характер течения этих процессов. Следовательно, в настоящее время созданы необходимые условия для проведения анализа долговечности машин на микроуровне, что позволяет оптимизировать мероприятия по обеспечению их работоспособности в эксплуатации.

1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Терминология, основные понятия и определения

Используемая терминология относится в основном к области науки, называемой теорией надёжности. Частично использованы термины из триботехники и системотехники.

Теория надёжности рассматривает следующие обобщённые объекты:

изделие – единица продукции, выпускаемая данным предприятием, цехом, отделением, участком и т. д.;

элемент – простейшая (при конкретном рассмотрении) составная часть изделия (системы);

система – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Необходимо учитывать, что понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленных и решаемых задач. Машина, например, при рассмотрении её собственной надёжности рассматривается как техническая система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, сборочных единиц, деталей и т. д., а при изучении надёжности функционирования комплектов и парков машин – как элемент этих **производственно - технических систем**.

Следовательно, **техническая система** – это совокупность элементов (технических объектов), которые объединены для самостоятельного выполнения заданных (определённых) функций.

Более сложные системы, такие как комплекты и парки машин, формируемые для производства определённых видов или наборов работ, правильнее называть **производственно - техническими**.

Основными свойствами любой системы, в том числе и технической, являются *организованность, управляемость и относительность*.

Организованность – это наличие определённой структуры, упорядоченность элементов, включенных в состав системы.

Управляемость – способность системы реагировать на воздействия определённых факторов и однозначно при этом изменяться.

Относительность (иерархичность) – это положение, когда любая система является подсистемой более крупной системы. Например, автомобиль может быть представлен как техническая система, если рассматривается его надёжность, или как подсистема, если рассматривается надёжность функционирования машинно - транспортного комплекта машин, как технической системы более высокого уровня в иерархии.

Из свойства относительности (иерархичности) технических систем вытекают следующие законы:

- системы на каждом из уровней принадлежат различным по степени сложности классам;
- все теоретические и эмпирические закономерности, полученные для нижнего уровня, справедливы для любого более высокого уровня сложности технических систем данного класса;
- чем выше уровень сложности технической системы, тем большее количество переменных параметров и закономерностей требуется для описания ее поведения.

Эти законы положены в основу методологии исследования работоспособности технических систем, а также управления их надёжностью в эксплуатации.

Иерархия технических систем в области исследования надёжности машин может быть представлена в виде схемы (таблица 1.1).

С повышением уровня сложности технической системы (таблица 1.1) возрастает число переменных параметров и степень неопределенности её состояния. Поэтому при управлении надёжностью этих систем возрастает роль вероятностных методов.

Таблица 1.1 – Иерархия технических систем

Уровень сложности ТС	Стадия		
	конструирование	производство	эксплуатация
Деталь	Расчёт износостойкости и долговечности	Обоснование технологических методов обработки	Расчёт ресурса. Обоснование технологических методов восстановления
Сопряжение	Подбор материалов, обоснование параметров. Расчёт долговечности	Обоснование технологических методов сборки, приработки	Экспертиза отказов. Обоснование периодичности технических воздействий
Сборочная единица	Расчёт показателей надёжности; обоснование режимов работы; расчёт периодичности технических обслуживаний и ремонтов	Обеспечение при сборке установленных норм точности и промышленной чистоты	Расчёт потребности в запасных частях, расчёт оптимальной периодичности технических воздействий
Машина	Расчёт показателей надёжности; формирование видов технических обслуживаний и ремонтов	Обоснование режимов и продолжительности обкатки; обеспечение промышленной чистоты при сборке	Оптимизация видов и периодичности технических воздействий с учётом условий эксплуатации
Комплект, парк машин	Расчёт потребности в запасных частях и эксплуатационных материалах		Расчёт комплексных показателей надёжности: коэффициентов готовности K_2 и технического использования K_{mi}

На четвёртом и пятом уровнях при решении задач обеспечения работоспособности широко используются статистические и технико - экономические методы.

Разработка мероприятий по обеспечению работоспособности технических систем на первых трёх уровнях должна базироваться на результатах исследования процессов, происходящих в элементах этих систем в период эксплуатации. К таким процессам относят следующие: изменение параметров деталей вследствие изнашивания; старение, усталость материалов деталей; изменения параметров деталей вследствие пластических деформаций; изменение физико - механических свойств материалов деталей под воздействием факторов окружающей среды в период эксплуатации (разупрочнение, наклёп,

коррозия, снижение эластичности резинотехнических и полимерных изделий и т. п.).

Все эти процессы ведут к снижению работоспособности элементов технических систем. Они являются следствием физико - химических процессов: теплообмена, взаимодействия контактирующих поверхностей деталей при работе, изнашивания, старения смазочных материалов, окисления и коррозии конструкционных материалов.

Для разработки мероприятий по обеспечению работоспособности технических систем важно иметь полную и достоверную информацию обо всех физико - химических и других процессах, происходящих в элементах этих систем во время эксплуатации. Например, знание закономерностей изнашивания позволяет рассчитать ресурс элементов, определить периодичность проведения регулировочных или восстановительных работ. Знания о процессах старения смазочных материалов позволяют определить оптимальные периодичности их замены, обеспечивая тем самым рациональные режимы трения в узлах и парах трения. Систематизированные знания о процессах взаимодействия рабочих поверхностей деталей позволяют оптимизировать профили этих поверхностей, подобрать материалы деталей и рациональные режимы приработки их рабочих поверхностей.

Все изделия промышленности делят на две группы:

- *невосстанавливаемые*, которые не могут быть восстановлены потребителем после использования их ресурса и подлежат замене, например, электрические лампы, тормозные накладки, подшипники качения, резиновые манжеты и т. п.;

- *восстанавливаемые*, которые могут быть восстановлены потребителем после достижения предельного состояния, например, двигатель внутреннего сгорания, комбайн, автомобиль и т. д.

Сложные изделия (технические системы), состоящие из большого числа элементов, как правило, восстанавливают, так как их отказы обычно связаны с повреждением одного или нескольких элементов, в то время как дру-

гие остаются работоспособными. Простые элементы технических систем, особенно покупаемые со стороны и изготавливаемые методами массового производства, обычно не восстанавливаются.

Основные понятия и термины теории надёжности стандартизованы. Надёжность технических систем характеризуется следующими основными *состояниями и событиями*:

Работоспособность – состояния системы и её элементов, при которых они способны нормально выполнять заданные функции, причём с параметрами, установленными нормативно - технической документацией. *Работоспособность* не касается требований, непосредственно не влияющих на эксплуатационные показатели технической системы, например, повреждение окраски и т. п.

Исправность – состояние технической системы, при котором она удовлетворяет всем не только основным, но и вспомогательным требованиям. *Исправная* техническая система обязательно *работоспособна*. *Работоспособная* техническая система может быть признана неисправной в случаях отсутствия или неисправности отдельных её элементов, которые не препятствуют применению системы по назначению.

Частным случаем *неработоспособного состояния* является **предельное состояние (ПС)**, при котором дальнейшая эксплуатация технической системы недопустима или нецелесообразна, либо *восстановление работоспособности* невозможно или нецелесообразно. Переход системы в ПС влечёт за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации, т. е. система должна быть снята с эксплуатации, направлена в капитальный ремонт, списана, передана для использования не по назначению. Критерии ПС обычно устанавливаются в технической документации.

Неисправность – состояние технической системы, при котором она не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Различают неисправности, не приводящие к отказам, и неисправности и их сочетания, вызывающие отказы технических систем.

При оценке технического состояния транспортных машин и их элементов часто применяют понятие *предотказного* состояния системы, при котором её дальнейшая эксплуатация в течение межремонтного периода может привести к возникновению отказа.

Отказ – случайное событие, заключающееся в полной или частичной потере работоспособности.

Свойства технических систем с позиций теории надёжности определяются их *безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью*. Таким образом, надёжность технических систем характеризуется свойствами, проявляющимися в эксплуатации и позволяющими судить о том, насколько система оправдывает надежды и требования изготовителей и потребителей.

Под **безотказностью** понимают свойство технической системы выполнять заданные функции в течение некоторой наработки с момента ввода в эксплуатацию и до предельного состояния без перерывов на техническое обслуживание и ремонт. Иначе *безотказность* можно определить как надёжность в узком смысле этого слова, т. е. это свойство непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени или наработки. Это свойство особенно важно для технических систем, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей или с перерывом в работе большого комплекса машин, с остановкой автоматизированного или непрерывного производства.

Важным свойством, особенно для интенсивно используемых технических систем, является **долговечность** – свойство сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Свойство технической системы, заключающееся в её приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов (повреждений) и устранению их путём проведения ремонтов и технических обслуживаний, называется **ремонтпригодностью**.

Ремонтопригодность является весьма важным свойством технической системы. При достаточно высоких показателях ремонтпригодности в случае возникновения отказа он может быть найден и устранен, а работоспособность технической системы восстановлена. Однако с усложнением систем всё труднее становится находить причины отказов и отказавшие элементы. Так, в сложных электрогидравлических системах поиск причин отказа может занимать более 50 % общего времени восстановления работоспособности. Поэтому облегчение поиска отказавших элементов должно закладываться в конструкции новых сложных технических систем. Важность ремонтпригодности технических систем определяется огромными затратами на ремонт при их эксплуатации.

Сохраняемость – это свойство технической системы сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности системы выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования. Это свойство характеризует способность технической системы противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности хранения и транспортирования и сохранять при этом значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности.

Показателем надёжности называется количественная характеристика одного или нескольких свойств, определяющих надёжность технической системы. *Единичный показатель* относится к одному из свойств, определяющих надёжность системы, *комплексный* – к нескольким.

Показатели надёжности определяются на основе *параметров*, характеризующих работу технических систем во времени. Рассматривая работу технических систем или их элементов с позиций обеспечения работоспособности, можно выделить следующие параметры: наработку до первого отказа или между отказами t_o , время восстановления работоспособности после отказа T_v , наработку до предельного состояния T_p , количество отказов за определенную наработку $\lambda(t)$, наработку до списания технической системы T_{cn} . Для

невосстанавливаемых элементов технических систем первый отказ является единственным, при его наступлении состояние элемента – предельное.

Все перечисленные параметры являются случайными величинами, что объясняется как рассеиванием характеристик при изготовлении новых технических систем, так и многообразием условий эксплуатации (климатические, режимы нагружения, уровень обслуживания и т. п.). Поэтому их обработку можно произвести только методами математической статистики и теории вероятностей.

Полной характеристикой надёжности является *функция распределения* или *плотности вероятностей* параметров, характеризующих надёжность. Для удобства пользования показателями вместо распределений берут их числовые характеристики – *математическое ожидание* (среднее значение), *среднее квадратическое отклонение* и др.

Показатели безотказности. Основными показателями безотказности технических систем являются вероятность безотказной работы $P(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$, наработка на отказ t_o и параметр потока отказов $\omega(t)$.

Вероятность безотказной работы является наиболее важным показателем безотказности технических систем. Она определяет вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ рассматриваемой технической системы не возникает. Вероятность безотказной работы – *функция времени* $P(t)$. Статистически она определяется отношением числа систем, безотказно проработавших до какой-либо наработки t , к общему количеству наблюдаемых технических систем.

Интенсивность отказов – показатель надёжности восстанавливаемых элементов технических систем, который также является функцией времени $\lambda(t)$. Статистически функция $\lambda(t)$ определяется отношением среднего числа отказавших в единицу времени (или наработки в других единицах, например, в километрах пробега для автомобилей) элементов к числу элементов, оставшихся работоспособными. Этот показатель более чувствителен,

чем вероятность безотказной работы, особенно для технических систем высокой надёжности.

Наработка на отказ – отношение наработки восстанавливаемых элементов технических систем к числу их отказов в течение этой наработки. Величина её зависит от продолжительности эксплуатации, так как с увеличением наработки технической системы меняется характеристика потока отказов. В качестве показателя безотказности технических систем используют среднюю наработку на отказ их восстанавливаемых элементов t_0 .

Параметр потока отказов представляет собой скорость их появления по мере увеличения наработки, является её функцией и измеряется в отказах на единицу наработки. Понятие «параметр потока отказов» выводится из общей схемы отказов технических систем в эксплуатации, при этом фиксируются только моменты их возникновения, время восстановления работоспособности не учитывается.

Моменты отказов формируют их **поток**. В качестве характеристики *потока отказов* используется **ведущая функция потока $\Omega(t)$** – математическое ожидание (среднее значение) числа отказов за определённую наработку. Число отказов за любой интервал наработки от t до $t + \Delta t$ определяется по формуле

$$r(t; t + \Delta t) = \Omega(t + \Delta t) - \Omega(t), \quad (1.1)$$

где $r(t; t + \Delta t)$ – число отказов за интервал наработки Δt .

Отношение числа отказов за интервал наработки Δt к его величине при стремлении Δt к нулю даёт *параметр потока отказов*.

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[\Omega(t + \Delta t) - \Omega(t)]}{\Delta t - \Omega(t)}. \quad (1.2)$$

Для технических систем применяется среднее значение параметра потока $\bar{\omega}$ отказов за какой - либо период.

За один и тот же период наработки среднее значение параметра потока отказов и средняя наработка на отказ связаны соотношением

$$t_0 = \frac{1}{\bar{\omega}}. \quad (1.3)$$

Показатели долговечности. Для технических систем ими являются *срок службы и ресурс*.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации технической системы от её начала или возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Ресурс (точнее, **технический ресурс**) – наработка технической системы от начала эксплуатации или её возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Ресурс выражается в единицах времени работы (обычно в часах), длины пройденного пути (в километрах) и в единицах выпуска продукции. Для невосстанавливаемых элементов технических систем понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают. Для них технический ресурс используется в качестве критерия долговечности.

Для машин, эксплуатируемых в различных условиях и нуждающихся в более точном показателе, чем календарный срок службы, также в качестве критерия долговечности используется технический ресурс. В частности, для транспортных машин – пробег в километрах, для двигателей – наработка в мото - часах. Для прочих технических систем используется срок службы.

Ресурсы разделяют на гамма - процентные, средние до текущего (или капитального) ремонта, полные, средние до списания. Гамма - процентные ресурсы – это показатели, которые имеют или превышают в среднем обусловленное число элементов или технических систем данного типа. Они характеризуют долговечность технических систем при заданной вероятности сохранения работоспособности.

Гамма - процентный ресурс – наработка, в течение которой техническая система **не** достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов. Иначе, гамма - процентный ресурс определяет наработку, при достижении которой заданный процент γ технических систем или их элементов будет находиться в работоспособном состоянии, или $(100 - \gamma)$ % указанных объектов достигнут предельного состояния.

Для большинства технических систем принята **регламентированная вероятность** $\gamma = 80 \%$; соответствующий этому значению ресурс называется восьмидесятипроцентным ($T_{80} \%$). Для весьма ответственных технических систем γ - процентный ресурс выбирают в размере 90...95 % и выше. Если отказ опасен для жизни людей γ - процентный ресурс приближают к 100 %.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса технических систем.

Средний ресурс до капитального ремонта T_p – наработка от начала эксплуатации технической системы до её первого капитального ремонта.

Средний ресурс до списания представляет собой среднее значение ресурса от начала эксплуатации технической системы до её списания, обусловленного предельным состоянием.

Для технических систем, прошедших капитальный ремонт, вводится понятие «**средний ресурс между капитальными ремонтами**» или **межремонтный ресурс** – наработка между двумя смежными капитальными ремонтами.

Полный ресурс – наработка технических систем, проходящих капитальные ремонты, от начала эксплуатации до списания, обусловленного предельным состоянием.

При оценке надёжности крановых грузоподъёмных, грузозахватных устройств и приспособлений, а также различных лифтов вводится понятие «**назначенный ресурс**», определяющее суммарную наработку той или иной технической системы, по достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от её технического состояния.

Показатели ремонтпригодности. Для оценки ремонтпригодности технических систем используют следующие показатели: среднее время восстановления, вероятность восстановления в заданное время, средняя суммарная стоимость технического обслуживания, средняя трудоёмкость восстановления и др.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления работоспособности. Оно характеризует продолжительность вынужденного простоя, необходимого для обнаружения и устранения одного отказа.

Вероятность восстановления исправности или работоспособности технической системы **в заданное время** – вероятность того, что возникший отказ будет обнаружен и устранён в заданное (нормативное) время. Этот показатель характеризует приспособленность технической системы к проведению текущего ремонта при ограниченных затратах времени.

Средняя суммарная стоимость технического обслуживания – экономический показатель ремонтпригодности, характеризующий затраты труда, рабочего времени и материалов на проведение технического обслуживания.

Средняя трудоёмкость восстановления – показатель, характеризующий средние суммарные трудозатраты на ремонты за определённый период эксплуатации. Показатели средних трудозатрат на текущий, средний и капитальный ремонты технических систем в практике их эксплуатации используют раздельно.

Показатели сохраняемости. Сохраняемость технических систем обычно характеризуется *гамма - процентным и средним сроками сохраняемости*. Показатели сохраняемости по своей сути соответствуют показателям долговечности и определяются по тем же зависимостям. Больше внимание обеспечению сохраняемости следует уделять при создании технических систем сезонного использования, сменного рабочего оборудования и различных неметаллических элементов, таких как резиновые рукава и шланги, пневматические камеры, покрышки, пыльники и т. п.

Комплексные показатели надёжности. Каждый из описанных выше показателей позволяет оценить лишь одно из свойств надёжности технических систем. Для более полной оценки надёжности используют комплексные показатели, позволяющие одновременно оценить несколько важнейших

свойств технической системы, обычно безотказность и ремонтпригодность. К таким показателям относят *коэффициенты готовности и технического использования*.

Коэффициент готовности определяет вероятность того, что техническая система окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение технической системы по назначению не предусматривается. Стационарное значение коэффициента готовности K_r определяют по формуле

$$K_r = \frac{t_0}{t_0 + T_B} \quad (1.4)$$

где t_0 – средняя наработка на отказ;

T_B – среднее время восстановления.

Коэффициент технического использования определяется как отношение математического ожидания суммарного времени пребывания технической системы в работоспособном состоянии ($t_{paб}$) за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания технической системы в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием (t_{mo}) и ремонтом ($t_{рем}$) за тот же период

$$K_{ти} = t_{paб} / (t_{paб} + t_{mo} + t_{рем}). \quad (1.5)$$

Технические системы с позиций надёжности и по своей структуре могут быть *последовательными, параллельными и комбинированными*.

Понятие «**последовательная система**» в задачах надёжности более широкое, чем обычно. Примером последовательных систем могут служить механические трансмиссии транспортных и технологических машин. В них название реализуется буквально, поскольку никаких резервных элементов и цепей в такого рода системах нет, и отказ любого из элементов приводит к отказу всей системы. Необходимо иметь в виду, что к числу последовательных систем относят все системы, в которых отказ элемента приводит к отказу всей системы. Например, систему подшипников обычной механической коробки перемены передач рассматривают как последовательную, хотя под-

шипники каждого вала работают параллельно, однако выход из строя любого из них приводит к отказу всей системы.

К категории **параллельных** технических **систем** относят те системы, отказы элементов в которых не приводят к отказу системы в целом, в крайнем случае, может снизиться только эффективность функционирования системы. **Резервированные системы** также относят к категории *параллельных*.

Параллельными системами являются системы гидравлического, пневматического или электрического приводов машин, многомоторные самолеты, суда с двумя машинами и др.

Комбинированные системы – это частично резервированные технические системы.

Многие технические системы состоят из элементов, отказы каждого из которых можно рассматривать как независимые. Такое рассмотрение достаточно широко применяется по отказам функционирования систем и иногда как первое приближение – по параметрическим отказам.

Технические системы могут включать элементы, изменение параметров которых определяет отказ системы в совокупности или даже влияет на работоспособность других элементов. К этой группе относится большинство технических систем при точном рассмотрении их по параметрическим отказам. Например, отказ двигателя внутреннего сгорания по параметрическому критерию – давление масла в системе смазки – определяется совокупным изменением зазоров в подшипниках коленчатого и распределительного валов и в цилиндро - поршневой группе из - за повышенных износов.

В расчётах надёжности и обеспечении работоспособности технических систем многие *параметры* должны рассматриваться как *случайные величины*, т. е. такими, которые могут принять то или иное значение, неизвестное заранее. Они могут изменяться непрерывно или дискретно.

Внезапные отказы технических систем определяются, как правило, случайными неблагоприятными сочетаниями нескольких факторов. Случайность связана с тем, что в своём большинстве причины события остаются для

нас скрытыми. Существенное рассеяние имеют действующие в процессе эксплуатации нагрузки, механические характеристики материалов и деталей, зазоры и натяги, которые при сборке получаются как разности сопрягаемых размеров. Рассеяние ресурсов по критерию усталости (оцениваемое отношением наибольшего ресурса к наименьшему), например, для подшипников качения достигает 40, для зубчатых передач – 10...15. Рассеяние ресурсов по износу также весьма значительно.

По этой причине, в расчётах надёжности используется математический аппарат теории вероятностей.

Для каждого числа x в диапазоне изменения случайной величины X существует определённая вероятность $P(X < x)$, что X не превосходит x . Эта зависимость $F(x) = P(X < x)$ называется функцией распределения, или **функцией вероятности случайной величины X** .

Функция $F(x)$ является неубывающей функцией x (монотонно возрастающей для непрерывных процессов и ступенчато возрастающей для дискретных процессов). В пределах изменения случайной величины X она изменяется от 0 до 1. С точки зрения теории надёжности функция распределения $F(x)$ отражает изменение вероятностей отказов, а каждое её численное значение указывает вероятность отказа при определённой наработке t , т. е. $F(x) = F(t)$.

Производная от функции распределения по текущей переменной $f(x) = dF(x) / dx$ называется **плотностью распределения**. Она характеризует частоту повторений данного значения случайной величины. В задачах теории надёжности она широко используется как **плотность вероятности**.

В ряде случаев достаточно характеризовать распределение случайной величины некоторыми числовыми величинами: *математическим ожиданием* (средним значением), *модой и медианой*, характеризующими положение центров группирования случайных величин по числовой оси, *дисперсией*, *средним квадратическим отклонением*, *коэффициентом вариации*, характеризующими рассеяние случайной величины.

Математическое ожидание (среднее значение) m_x – основная и простейшая характеристика случайной величины X . Значение математического ожидания, определяемое по результатам наблюдений, как для дискретных, так и для непрерывных величин, называют **оценкой** математического ожидания, или оценкой среднего значения \bar{x} :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}, \quad \text{или} \quad \bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{N} \cdot x_i \quad (1.6)$$

где N – общее число наблюдений;

x_i – значение случайной величины;

q_i – число одинаковых значений x_i .

Черта над обозначением случайной величины означает, что она имеет среднее значение.

При достаточно большом числе наблюдений (испытаний) полагают, что $m_x = \bar{x}$.

В вероятностных задачах математическое ожидание определяют в зависимости от плотности распределения $f(x)$ (для непрерывных величин) или вероятности p_i появления значения x_i (для дискретных величин):

$$m_x = \int_{-\infty}^x x \cdot f(x) dx; \quad m_x = \sum_{i=1}^N p_i \cdot x_i \quad (1.7)$$

Дисперсия случайной величины – математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от её математического ожидания.

Оценка дисперсии случайной величины – среднее значение квадрата разности между значениями случайной величины и её средним значением:

$$D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N q_i \cdot (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.8)$$

Термин «дисперсия» означает рассеивание и характеризует в нашем случае разброс случайной величины.

Для непрерывных случайных величин

$$D_x = \int_{-\infty}^x (x - m_x)^2 \cdot f(x) dx \quad (1.9)$$

Для дискретных случайных величин

$$D_x = \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2 \cdot p \quad (1.10)$$

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины. Так как удобнее пользоваться характеристикой рассеяния, имеющей ту же размерность, что и случайная величина, вводится понятие другой характеристики – *среднего квадратического отклонения*:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (1.11)$$

Для оценки рассеяния с помощью безразмерной (относительной) величины используют *коэффициент вариации*, равный

$$V_x = \frac{\sigma_x}{m_x}. \quad (1.12)$$

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение являются репрезентативными характеристиками рассеяния.

Квантилью называют значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности.

Квантиль, соответствующая вероятности 0,5, называется **медианой**. Медиана характеризует расположение центра группирования случайной величины. Площадь под графиком функции плотности распределения делится медианой пополам.

Для характеристики рассеяния случайной величины используют также вероятное отклонение, равное половине разности квантилей $X_{0,75}$ и $X_{0,25}$, т. е. значений случайной величины, соответствующих вероятностям 0,75 и 0,25.

Модой случайной величины называется её наиболее вероятное значение или, иначе, то её значение, при котором плотность вероятности максимальна.

Параметры надёжности в статистической трактовке используются для оценки технического состояния систем, а **в вероятностной трактовке** – для прогнозирования поведения технических систем на последующих этапах эксплуатации. Первые выражаются обычно в дискретных числах и их в теории надёжности называют **оценками**. При достаточно большом количестве наблюдений (испытаний) они принимаются *за истинные характеристики надёжности*.

Если в эксплуатации находится значительное число N элементов технических систем в течение времени t (или наработки в других единицах) и к концу срока эксплуатации останется N_p работоспособных (неотказавших) элементов и n отказавших, то вероятность отказа $F(t) = n / N$, а вероятность безотказной работы оценивается относительным количеством работоспособных элементов

$$P(t) = \frac{N_p}{N} = 1 - \frac{n}{N}. \quad (1.13)$$

Так как безотказная работа и отказ – взаимно противоположные (*несовместные*) события, то сумма их вероятностей равна 1.

$$P(t) + F(t) = 1. \quad (1.14)$$

Это же следует из приведённых зависимостей, т. е. при $t = 0$ $n = 0$, $F(t) = 0$ и $P(t) = 1$, а при $t = \infty$ $n = N$, $F(t) = 1$ и $P(t) = 0$.

Распределение отказов элементов технических систем по времени характеризуется функцией плотности распределения $f(t)$ наработки до отказа. В статистической трактовке

$$f(t) = \frac{\Delta n}{N \cdot \Delta t} = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} \quad (1.15)$$

где Δn и $\Delta F(t)$ – приращение числа отказавших элементов и, соответственно, вероятности отказов за время Δt .

В вероятностной трактовке

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (1.16)$$

Вероятности отказов и безотказной работы в функции плотности распределения $f(t)$ выражаются зависимостями:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt; \text{ при } t = \infty F(t) = \int_0^\infty f(t)dt = 1 \quad (1.17)$$

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt \quad (1.18)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ в отличие от плотности распределения относится к числу элементов N_p , оставшихся работоспособными, а не к общему числу элементов.

Соответственно в статистической трактовке

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N_p \cdot \Delta t}, \quad (1.19)$$

а в вероятностной, учитывая, что $N_p / N = P(t)$,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.20)$$

Если в предыдущее выражение подставить $f(t) = \frac{dP(t)}{dt}$, разделить переменные и произвести интегрирование $\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t)dt$;

$$\ln P(t) = - \int_0^t \lambda(t)dt$$

то получим $P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$. (1.21)

Соотношение (1.21), устанавливающее связь между вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов, называется **основной формулой теории надёжности**.

К числу важнейших общих зависимостей теории надёжности относятся зависимости надёжности технических систем от надёжности их элементов.

Наиболее характерной для технических систем простейшей моделью, состоящей из последовательно соединённых элементов, является схема на рисунок 1.1. Отказ каждого элемента вызывает отказ всей системы, а отказы элементов принимаются независимыми. Надёжность таких систем оценивается исходя из следующих положений:



Рисунок 1.1 – Структурная модель последовательной технической системы

Используя известную теорему умножения вероятностей, согласно которой *вероятность произведения, т. е. совместного проявления независимых событий*, равна произведению вероятностей этих событий, можно сделать вывод о том, что вероятность безотказной работы технической системы равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных её элементов:

$$P_{cm}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t). \quad (1.22)$$

Если $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t)$, то $P_{cm} = P_1^n(t)$. Поэтому надёжность сложных технических систем получается низкой. Например, если система состоит из 10 элементов с вероятностью безотказной работы, равной 0,9, то общая вероятность безотказной работы системы может быть получена таким образом: $0,9^{10} \approx 0,35$.

Обычно вероятность безотказной работы элементов таких систем достаточно высокая. Поэтому, выразив $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ через вероятности отказов и используя теорию приближенных вычислений, получим

$$P_{ct}(t) = [1 - F_1(t)] \cdot [1 - F_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - F_n(t)] \approx 1 - [F_1(t) + F_2(t) + \dots + F_n(t)]. \quad (1.23)$$

При $F_1(t) = F_2(t) = \dots = F_n(t)$ получаем

$$P_{ct}(t) = 1 - n \cdot F_1(t) \quad (1.24)$$

Вероятность безотказной работы нужно уметь определять для любого промежутка времени эксплуатации технической системы.

По теореме умножения вероятностей

$$P(T + t) = P(T) \cdot P(t) \text{ или } P(t) = \frac{P(T+t)}{P(T)} \quad (1.25)$$

где $P(T)$ и $P(T + t)$ вероятности безотказной работы за время T и $T + t$ соответственно; $P(t)$ – условная вероятность безотказной работы за время t (термин «условная» использован здесь потому, что вероятность определяется в предположении отсутствия отказов у элементов до начала рассматриваемого интервала времени или наработки).

В технической системе с параллельным соединением элементов (рисунок 1.2) представляет интерес определение вероятности безотказной работы всей системы, т. е. всех её элементов (или подсистем). Кроме того, интересует величина этого показателя системы без одного, двух, трёх и т. д. элементов (в пределах сохранения системой работоспособности), хотя и с сильно пониженными показателями эффективности функционирования.

Сохранение работоспособности технической системы, состоящей из одинаковых элементов, определяется с помощью биномиального распределения.

Рассматривают бином

$$[P(t) + F(t)]^m, \quad (1.26)$$

где показатель степени m равняется общему числу параллельно работающих элементов; $P(t)$ и $F(t)$ вероятности безотказной работы и соответственно отказа каждого из элементов.

Записывают результаты разложения биномов с показателями степени 2, 3 и 4 соответственно для систем с двумя, тремя и четырьмя параллельно работающими элементами:

$$(P + F)^2 = P^2 + 2P \cdot F + F^2 = 1.$$

$$(P + F)^3 = P^3 + 3P^2 \cdot F + 3P \cdot F^2 + F^3 = 1.$$

$$(P + F)^4 = P^4 + 4P^3 \cdot F + 6P^2 \cdot F^2 + 4P \cdot F^3 + F^4 = 1.$$

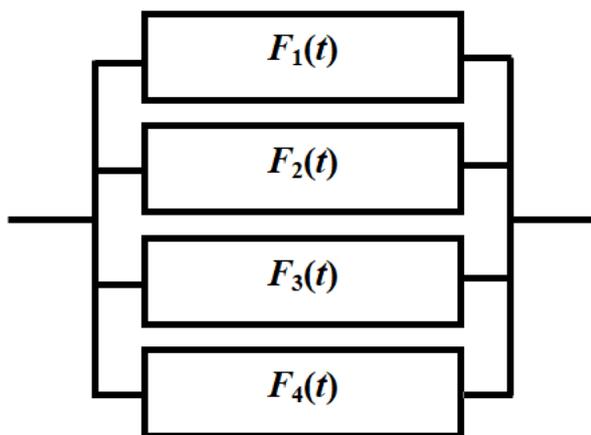


Рисунок 1.2 – Структурная модель параллельной технической системы

Первые члены этих выражений отражают вероятность безотказной работы всех элементов, вторые – вероятность отказа одного элемента и безотказной работы остальных. Первые два члена – вероятность отказа не более одного элемента (отсутствие отказа или отказ одного элемента) и т. д. Последний член выражает вероятность отказа всех элементов.

Для сложных технических систем одним повышением надёжности элементов не удастся достигнуть требуемой высокой надёжности системы. В та-

ких случаях используют *структурное резервирование*, осуществляемое введением в систему резервных составляющих, избыточных по отношению к минимально необходимой структуре системы и выполняющих те же функции, что и основные.

Резервирование позволяет уменьшить вероятности отказов сложных технических систем на несколько порядков.

При *постоянном резервировании* резервные элементы или цепи подключают параллельно основным (схема получается аналогичной параллельной, рисунок 1.2). Вероятность отказа всех элементов (основного и резервных) по теореме умножения вероятностей

$$F_{\text{ст}}(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (1.27)$$

где $F(t)$ – вероятность отказа элемента i ;

n – общее число элементов в системе (основной + резервные).

Вероятность безотказной работы системы

$$P_{\text{ст}}(t) = 1 - F_{\text{ст}}(t). \quad (1.28)$$

Если элементы одинаковые, то

$$F_{\text{ст}}(t) = F_1^n(t) \quad \text{и} \quad P_{\text{ст}}(t) = 1 - F_1^n(t) \quad (1.29)$$

Таким образом, в сложных технических системах с последовательным соединением элементов вероятность безотказной работы определяется произведением вероятностей безотказной работы элементов. В системах с параллельным соединением определяется вероятность отказа произведением вероятностей отказа элементов.

Для других способов резервирования элементов технических систем методы определения показателей надёжности будут рассмотрены ниже.

Более 80 % отказов технических систем происходит вследствие износа их элементов, поэтому при исследовании изменения работоспособности этих систем особое внимание уделяется *трению и изнашиванию*.

Внешним трением (*трением*) называют явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое *диссипа-*

цией энергии.

Диссипация энергии – переход части энергии движущегося тела в теплоту.

По наличию относительного движения различают *трение покоя* и *трение движения*.

По характеру относительного движения деталей – *трение скольжения* и *трение качения*.

По наличию смазочного материала – трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом.

Трение покоя – трение двух тел при микро перемещениях до перехода к относительному движению.

Трение движения – трение двух тел, находящихся в относительном движении.

Трение скольжения – трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по величине и направлению или только по величине, или только по направлению. Этот вид трения характерен для опор (подшипников) скольжения, направляющих и др.

Трение качения – трение движения двух твёрдых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению.

Основными количественными характеристиками (*показателями*) трения являются *сила трения* и *коэффициент трения*.

Силой трения называется сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами.

Коэффициент трения – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела одно к другому.

Сила трения скольжения

$$F_{\text{тр}} = f \cdot N, \quad (1.30)$$

где f – безразмерный коэффициент трения скольжения;

N – нормальная составляющая внешних сил.

Сила трения качения

$$F_{\text{тр.к}} = \frac{f_k \cdot N}{R} \quad (1.31)$$

где f_k – коэффициент трения качения;

R – радиус цилиндра качения;

N – нормальная составляющая внешних сил.

Коэффициент трения качения имеет линейную размерность и представляет собой полухорду зоны сжатия материала. Значение коэффициента трения качения зависит от упругих свойств материалов деталей сопряжения.

В узлах трения сборочных единиц часто возникает одновременно трение качения и трение скольжения. Это особенно характерно для элементов зубчатых передач.

Изнашиванием называют *процесс разрушения* и отделения материала с поверхности твёрдого тела и (или) накопления его остаточной деформации *при трении*, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. Основными количественными характеристиками изнашивания являются *износ, скорость изнашивания, интенсивность изнашивания*.

Износ – результат изнашивания (результат работы трения), определяемый в установленных единицах. *Износ (абсолютный или относительный)* характеризует изменение геометрических размеров (*линейный износ*), массы (*весовой износ*) или объёма (*объёмный износ*) детали вследствие изнашивания и измеряется в соответствующих единицах. Различают *предельный и допустимый* износы.

Предельным называют износ, соответствующий предельному состоянию изнашивающегося элемента.

Допустимым называют износ, при котором элемент сохраняет свою работоспособность. Допустимый износ всегда по абсолютной величине меньше предельного и соответствует предотказному состоянию элемента.

Скорость изнашивания V_u (м / ч, г / ч, м³ / ч) – отношение износа u к интервалу времени τ , в течение которого он возник:

$$V_u = \frac{И}{\tau} \quad (1.32)$$

Интенсивность изнашивания I – отношение износа к обусловленному пути L , на котором происходило изнашивание, или объёму выполненной работы V :

$$I = \frac{И}{L} \quad \text{или} \quad I = \frac{И}{M} \quad (1.33)$$

При линейном износе интенсивность изнашивания величина безразмерная, а при весовом – измеряется в единицах массы, отнесенных к единице пути трения.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения. Это величина, обратная скорости изнашивания или интенсивности изнашивания, в соответствующих единицах.

Приработка – процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико - химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения. Он чаще всего проявляется (при постоянных внешних условиях) в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

В каждом конкретном случае следует определить вид изнашивания поверхностей. Это необходимо в целях более эффективного управления процессами изменения технического состояния механических систем и обоснования мероприятий, направленных на снижение интенсивности изнашивания их элементов. Для этого задают следующие характеристики: тип относительного перемещения поверхностей (схему фрикционного контакта); характер промежуточной среды (вид смазочного материала или рабочей жидкости); основной механизм изнашивания.

В сопряжениях технических систем существуют четыре типа относительного перемещения рабочих поверхностей деталей: *скольжение, качение, удар, осцилляция*.

Осцилляцией называется перемещение, имеющее характер относи-

тельных колебаний с малой амплитудой (в среднем 0,02...0,05 мм).

По виду промежуточной среды между трущимися поверхностями различают следующие виды изнашивания. Это изнашивание при трении без смазочного материала, изнашивание при трении со смазочным материалом и изнашивание при трении с абразивным материалом.

В зависимости от свойств материалов деталей, смазочного или абразивного материалов, а также от их соотношения в сопряжениях в процессе работы возникают различного вида разрушения поверхностей. Поэтому изнашивание разделяют на следующие виды: *механическое* (абразивное, гидро- и газоабразивное, кавитационное, эрозионное, гидро- и газоэрозионное, усталостное, изнашивание при заедании, изнашивание при фреттинге); *коррозионно – механическое* (окислительное, изнашивание при фреттинг - коррозии); *изнашивание при действии электрического тока* (электроэрозионное).

Механическое изнашивание возникает в результате механических воздействий разного рода на поверхности трения.

Коррозионно - механическим называют изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрохимическим взаимодействием материала со средой.

Электроэрозионным называют эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока. В технических системах этот вид изнашивания наблюдается в элементах электрооборудования: в генераторах, электрических стартерах, электромоторах, а также в электромагнитных пускателях.

В реальных условиях работы сопряжений технических систем наблюдаются одновременно несколько видов изнашивания. Однако как правило, удаётся установить *ведущий вид изнашивания*, лимитирующий долговечность и работоспособность деталей, и отделить его от остальных, сопутствующих видов разрушения поверхностей, незначительно влияющих на работоспособность сопряжения.

Механизм ведущего вида изнашивания определяют путём тщательного изучения изношенных поверхностей деталей и условий их работы в сопряжениях. Характер проявления износа поверхностей трения (царапины, трещины, выкрашивания, отслоения окисных плёнок) и показатели свойств материалов деталей и смазочного материала, а также данные о наличии и виде абразива, интенсивности изнашивания и режиме работы сопряжения, позволяют с достаточной полнотой обосновать *заключение о виде изнашивания сопряжения*. Это необходимо для разработки мероприятий по повышению износостойкости, долговечности и работоспособности технических систем.

Абразивным называется механическое изнашивание материала детали в результате, в основном, режущего или царапающего действия на него абразивных частиц, находящихся в свободном или закреплённом состоянии.

Интенсивность абразивного изнашивания прямо пропорциональна твёрдости абразивных частиц H_a и обратно пропорциональна твёрдости поверхности трения $H_{мет}$.

Гидро- и газоабразивным изнашиванием называется абразивное изнашивание в результате действия твёрдых частиц, взвешенных в жидкости (или газе) и перемещающихся относительно изнашивающейся поверхности тела.

Эрозионным называется механическое изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости и (или) газа.

Гидроэрозионным (газоэрозионным) изнашиванием называется эрозионное изнашивание поверхностей в результате воздействия потока жидкости (газа).

Кавитационным называется гидроэрозионное изнашивание при движении твёрдого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создаёт местное повышение давления или температуры.

Усталостным называется механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъёмов материала поверхностного слоя детали.

Изнашивание при заедании происходит в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряжённую поверхность.

Коррозионно - механическое изнашивание характеризуется процессом истирания материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой. К коррозионно - механическому изнашиванию относят *окислительное изнашивание* и *изнашивание при фреттинг - коррозии*.

Окислительным называют изнашивание, при котором основное влияние на разрушение поверхности имеет химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой.

Изнашиванием при фреттинг - коррозии называется коррозионно - механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях.

Изнашивание при фреттинге – механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях в отсутствие окисляющей окружающей среды, без проявления химической реакции материалов деталей и продуктов износа с кислородом.

Избирательный перенос – это вид контактного взаимодействия деталей при трении, который возникает в результате протекания на поверхности комплекса механофизико - химических процессов. Он приводит, как правило, к снижению трения и автокомпенсации износа (иногда к явлению безызносности).

Водородное изнашивание – процесс разрушения металлического элемента пары трения вследствие поглощения металлом водорода.

1.2. Влияние различных факторов на работоспособность технических систем

Состояние технической системы оценивают по совокупности показателей, называемых *параметрами технического состояния*. Они позволяют также сравнивать системы между собой. Техническое состояние системы можно также косвенно оценить сопоставлением её технико - экономических показателей и показателей надёжности с эталонными (нормативными) значениями. Однако такая оценка не даёт представления о механизмах перехода элементов технических систем из одного состояния в другое, что является существенным недостатком.

Процесс изменения работоспособности технической системы может быть представлен следующим образом. В результате воздействия окружающей среды (атмосферных осадков, температуры, грунтовых условий и т. п.), режимов и характера нагружения, качества технического обслуживания, а также внутренних процессов (изнашивание, деформация, старение), происходит изменение физико - механических свойств материалов деталей. Оно проявляется в разупрочнении, снижении твёрдости, износостойкости. Эти изменения вызывают микроповреждения рабочих поверхностей деталей, которые, постепенно накапливаясь, вызывают изменения параметров и рабочих режимов сопряжений. Следствием этого является нарушение нормальных режимов работы сборочных единиц и системы в целом (увеличение зазоров, ухудшение температурного и нагрузочного режимов работы), что, в свою очередь, вызывает отказы технических систем.

Техническое состояние систем можно условно представить в виде своеобразного «чёрного ящика» (рисунок 1.3). Вход в него образуют показатели функционирования: КУ – климатические условия, ГУ – грунтовые условия, РР – режим работы, ХИ – характер использования, ТОР – система технического обслуживания и ремонта, ТД – техническая диагностика.

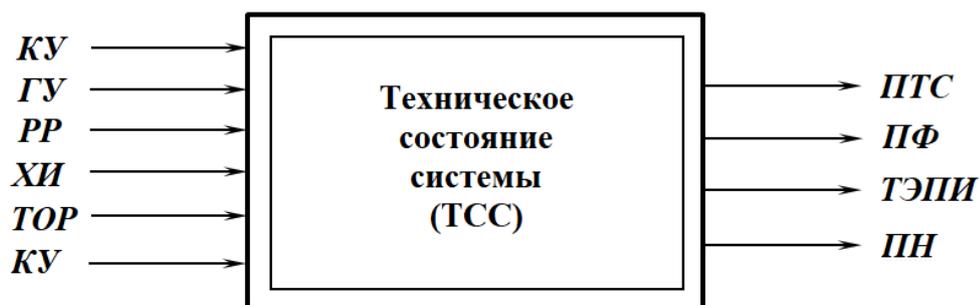


Рисунок 1.3 – Модель технического состояния системы

Выходом являются параметры и показатели использования: ПТС – параметры технического состояния, ПФ – параметры функционирования, ТЭПИ – технико - экономические показатели эффективности использования, ПН – показатели надёжности.

То, что происходит в самом «чёрном ящике», т. е. каким образом изменяется техническое состояние системы, определяет суть проблемы, которую с помощью теоретических исследований, статистических наблюдений и испытаний уже много лет пытаются разрешить многие ученые.

Несомненным и общепризнанным является то, что на изменение технического состояния систем наиболее существенное влияние оказывают две группы факторов:

I – конструктивно - технологические, определяющие исходное качество проектирования и изготовления технических систем;

II – комплекс эксплуатационных факторов, определяющих условия функционирования технических систем.

1.2.1. Конструктивно - технологические факторы влияния

Из данной группы к числу наиболее существенных факторов влияния на работоспособность технических систем относят выбор конструктивных решений при проектировании систем и их элементов. Подбор материалов деталей, технологических методов обработки, упрочнения и сборки также оказывают немаловажное влияние.

Обеспечение работоспособности технических систем связано со всеми этапами их проектирования, изготовления и использования. Это проявляется, начиная с момента формирования и обоснования идеи создания новой технической системы и кончая принятием решения об её списании. Каждый из этапов вносит свою лепту в решение трудной задачи создания системы с требуемым уровнем надёжности при приемлемых затратах времени и средств. Основные решения по надёжности, принятые на стадии проектирования или изготовления системы, непосредственно сказываются на её эксплуатационных и экономических показателях, которые нередко вступают между собой в противоречие. Поэтому выявление связей между показателями надёжности и возможностями их повышения на каждом из этапов проектирования, изготовления и эксплуатации технических систем, является одной из важнейших задач.

При проектировании и расчёте технической системы закладывается её надёжность. Она зависит от конструкции системы и её узлов, применяемых материалов, методов защиты от вредных воздействий, системы смазки, приспособленности к ремонту и обслуживанию и других конструктивных особенностей.

Рационализация компоновки и конструктивных решений технических систем позволяет свести к минимуму влияние производственных погрешностей и эксплуатационных факторов на их работоспособность и надёжность.

Очевидно, что более надёжны и работоспособны в эксплуатации технические системы, имеющие принципиально простые конструктивные схемы и решения. Выполненные из материалов с проверенными и апробированными в эксплуатации свойствами и требующие минимального объёма технического обслуживания при использовании по назначению, эти системы оказываются наиболее жизнеспособными.

При подборе материалов деталей и рационального их сочетания в кинематических парах исходят из необходимости обеспечения заданной износостойкости и долговечности при приемлемой стоимости. В то же время

необходимо учитывать назначение деталей и сопряжений, условия их работы, вид изнашивания.

Элементы современных технических систем изготавливают из конструкционных, износостойких, фрикционных, антифрикционных, антикоррозионных, композитных и других материалов. Наиболее широко используются качественные конструкционные и легированные стали, серый и ковкий чугуны, а также сплавы на основе меди и алюминия. Всё более широкое применение находят полимерные и композитные материалы.

Внезапные отказы технических систем, связанные с разрушением их элементов, возникают, как правило, в результате превышения предельно допустимых нагрузок. Уровень безотказности технической системы определяют соотношением наиболее вероятной (типичной) максимальной нагрузки на элемент и предельно допустимой расчётной нагрузки. Одним из путей повышения безотказности технических систем является увеличение запаса прочности их элементов. Повышение запаса прочности может быть достигнуто увеличением размеров деталей либо подбором материалов с более высокими пределами прочности, износостойкости, усталости и других механических характеристик. Повышение запаса прочности деталей за счёт увеличения их размеров нельзя отнести к числу перспективных направлений. Более предпочтительным является снижение нагруженности деталей путём рационализации формы и оптимизации параметров их рабочих поверхностей, что также приводит к повышению запаса прочности и безотказности элементов технических систем.

С целью предохранения дорогостоящих деталей от разрушения (при резком увеличении нагрузки) в конструкциях технических систем предусматривают установку предохранительных устройств, которые, как правило, представляют собой легкозаменяемые элементы с пониженным запасом прочности.

Для снижения интенсивности изнашивания технических систем и защиты от неблагоприятного воздействия факторов окружающей среды,

предусматривают герметизацию их узлов и элементов. С этой целью устанавливаются защитные кожухи, предохраняющие рабочие поверхности деталей от попадания влаги и абразивной пыли, применяют коррозионно - стойкие материалы, проектируют надёжные, герметичные системы смазки.

Значительную роль для повышения долговечности и работоспособности технических систем играют конструкции используемых уплотнений, обеспечивающих герметизацию внутренних объёмов узлов и агрегатов.

Защита элементов технических систем виброударного действия от динамических нагрузок путём применения современных амортизационных устройств или вынесения рабочего органа с вибратором за пределы силовой установки также позволяет повысить их долговечность и безотказность.

Невозможно достичь высокой надёжности и долговечности технических систем с устаревшим рабочим процессом и недостаточно совершенной структурной схемой или несовершенными механизмами. Следовательно, основным направлением повышения работоспособности является обеспечение высокого технического уровня систем.

К другому направлению следует отнести применение агрегатов и элементов с высокой надёжностью и долговечностью по самой их природе. Например, быстроходные агрегаты без механических передач, агрегаты и детали, работающие при чистом жидкостном трении или без механического контакта (электрическое торможение, бесконтактное электрическое управление); детали, работающие при напряжениях ниже пределов выносливости и т. д.

Можно упомянуть также об элементах, самоподдерживающих работоспособность: самоустанавливающихся, самоприрабатывающихся, самосмазывающихся, а также о самонастраивающихся и самоуправляющихся системах.

Наконец, резервом повышения надёжности и работоспособности является переход на изготовление технических систем по жёстко регламентированной и контролируемой технологии. При этом значительно уменьшается

рассеяние ресурса, так как надёжность целого ряда элементов систем во многом зависит даже от колебаний размеров в пределах полей допусков. Следовательно, чем меньше допуски, тем меньше колеблются параметры систем, тем выше их надёжность и работоспособность в эксплуатации. *При изготовлении (производстве) технической системы обеспечивается её надёжность.* Она зависит от качества изготовления деталей, методов контроля точности выполнения технологических операций, возможностей управления ходом технологического процесса. Ещё в большей степени надёжность зависит от качества сборки системы, её узлов и агрегатов, методов испытания готовой продукции и других показателей технологических процессов. Для контроля качества изготовления технических систем могут быть использованы следующие методы: *теории статистической классификации, случайных процессов, информативных параметров.*

Методы теории статистической классификации чувствительны к возможным нестабильностям технологии производства. Их применение связано с обработкой больших объёмов исходной информации.

Методы теории случайных процессов чрезвычайно трудоёмки, так как их использование связано с проведением обучающих испытаний и длительным наблюдением за процессами изменения параметров каждой контролируемой технической системы.

Метод информативных параметров позволяет частично избежать указанных трудностей благодаря привлечению некоторых, достаточно общих физических зависимостей. Они характеризуют развитие дефектов в технических системах. Причём, обобщение значительного экспериментального материала позволило установить, что большая часть параметров, характеризующих работоспособность технических систем, такова, что вероятность отказа этих систем является монотонно нарастающей функцией таких параметров.

Для жизненно важных технических систем характерным является использование *резервирования*. Резервирование агрегатов и узлов широко применяют в системах управления, регулирования и аварийных системах. При

этом, как правило, применяют системы и агрегаты с нагруженным резервом. Ненагруженный резерв применяется, в основном, как аварийный.

При конструировании резервированных технических систем стремятся обеспечить выполнение ряда принципов, заключающихся в следующем. Источники питания дублирующих систем должны быть независимы от основной системы, а их коммуникации максимально удалены от основной. Структуру резервных систем управления целесообразно строить по методу «пересиливания» или «подавления» отказавшего агрегата или элемента. Этот метод более эффективен по сравнению с методом использования специальных устройств, предназначенных для определения отказавшего агрегата (системы) и их отключения.

1.2.2. Комплекс эксплуатационных факторов влияния

Надёжность технической системы реализуется при её эксплуатации. Показатели безотказности и долговечности проявляются только в процессе использования технической системы по назначению. Они зависят от методов и условий эксплуатации техники, принятой системы её ремонта, методов технического обслуживания, режимов работы и других эксплуатационных факторов.

В процессе эксплуатации техническая система взаимодействует с окружающей средой, а её элементы взаимодействуют между собой. Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико - химическими явлениями и приводят к деформации, износу, поломке, коррозии и другим видам повреждений.

Наибольшее количество неисправностей (отказов) возникает из - за износных и коррозионных явлений на рабочих поверхностях деталей. При этом отказ проявляется не сразу, а после того, как величина износа или коррозии доходит до критической величины. Таким образом, достигается пре-

дельное состояние технической системы или её элементов. Износные и коррозионные процессы проявляются в виде трёх групп изменений:

- 1) изменения геометрических размеров и форм поверхностей деталей;
- 2) смещение поверхностей деталей относительно друг друга (прогиб, нарушение перпендикулярности, параллельности, соосности и т. п.);
- 3) изменение физико - механических свойств материала детали (потеря твёрдости, упругости, выкрашивание цементационного слоя, появление усталостных трещин и т. д.).

Указанные изменения в деталях, достигая предельного значения, определяют момент исчерпания ресурса сборочной единицы, т. е. момент наступления предельного состояния. Таким образом, **основной причиной старения** технических систем является **изнашивание** в самом широком смысле этого понятия.

Все причины появления неисправностей технических систем в эксплуатации можно объединить в три основные группы (рисунок 1.4).

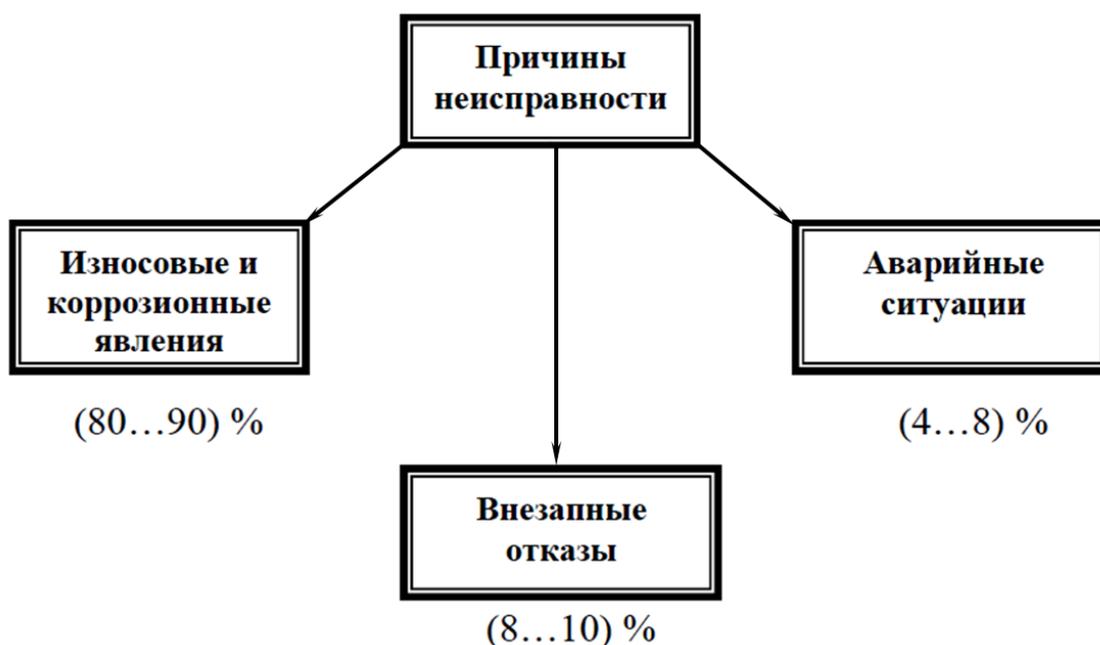


Рисунок 1.4 – Виды и распределение причин неисправностей технических систем в эксплуатации

На схеме приведена количественная оценка (в %) появления причин неисправностей технических систем.

Причинами внезапных отказов являются:

а) неблагоприятное сочетание многих (объективных и субъективных) обстоятельств, т. е. условий работы, силовых и других внешних воздействий, квалификации операторов и т. п.;

б) накопление усталостных изменений в материалах деталей, приводящее к их ослаблению в отдельных сечениях и последующему разрушению при нагрузках, не превышающих номинальные;

в) перегрев деталей вследствие прекращения подачи смазки, их коробление и другие возможные температурные деформации;

г) нарушение технологии производства и ремонта как отдельных элементов так и систем в целом;

д) конструктивная недоработка отказавшего узла (агрегата);

е) концентрации внутренних напряжений (технологических, термических, деформационных и проч.);

ж) нарушение правил эксплуатации, приводящее к возникновению перегрузок.

Основным признаком внезапного отказа является *независимость* вероятности его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени от t_1 до t_2 от *длительности предшествующей работы* системы t_1 .

Время возникновения внезапного отказа T_o является случайной величиной и подчиняется некоторому закону распределения $f(T_o)$, не зависящему от состояния технической системы. Процесс протекает весьма быстро (скорость процесса повреждения $\gamma \rightarrow \infty$) и поэтому функция $f(T_o)$ фактически определяет вероятность безотказной работы системы.

Группа неисправностей, являющихся следствием возникающих аварийных ситуаций, проявляется в эксплуатации при столкновениях, наездах, опрокидываниях и других случайных событиях, также вызываемых неблагоприятным стечением различных обстоятельств.

Названные две группы неисправностей приводят к потере работоспособности технических систем и устраняются при проведении текущего ремонта.

Как уже отмечалось, основной, постоянно действующей причиной изменения технического состояния механизмов в эксплуатации, является изнашивание деталей. Процесс изнашивания зависит от материала и качества поверхностей сопряженных деталей, характера контакта и условий трения, нагрузки, скорости относительного перемещения.

Наиболее разрушительное действие на элементы технических систем оказывает абразивное изнашивание. Абразивное изнашивание является одним из наиболее распространенных и разрушительных видов изнашивания. Более 60 % отказов строительных, дорожных и сельскохозяйственных машин вызываются абразивным износом. Этот вид изнашивания характерен для рабочих органов экскаваторов, бульдозеров, скреперов, автогрейдеров. Абразивному изнашиванию также подвергаются пальцы и траки гусениц, диски сцеплений, накладки тормозных колодок и тормозные барабаны, днища ковшей, корпусов и т. п.

Износ элементов технических систем растёт вместе с увеличением времени их работы. До известного предела нарастание износа не влечёт за собой качественных изменений в работе систем и может считаться естественным (нормальным). За ним наступает **аварийный износ** элементов данной технической системы.

Процессы изнашивания многообразны, они достаточно хорошо изучены. Для анализа причин возникновения износа важны результаты процесса изнашивания. Информация о величине износа и динамике изнашивания по наработке представляет собой *характеристику изнашивания*. Она позволяет провести оценку технического состояния машины и выявить причины возникновения отказов. При этом появляется возможность обосновать способы восстановления изношенных поверхностей деталей, определить величины ресурса элементов и технических систем в целом.

Поскольку износ многих технических систем является основной причиной потери ими работоспособности, необходимо лимитировать показатели, определяющие интенсивность процесса изнашивания. При этом должна быть

дана оценка допустимой скорости изнашивания, а для повышения износостойкости сопряжений применены различные методы поверхностного упрочнения. Основным критерием для регламентации показателей износа являются требования надёжности, предъявляемые к машине. Установление предельно допустимых значений для показателей износа элементов технических систем и контроль над их соблюдением являются важным средством создания машин с оптимальными показателями износостойкости. Для создания износостойких машин необходимо также регламентировать те показатели изношенного сопряжения и те условия эксплуатации, которые определяют срок службы (наработку) технической системы до отказа. Это в первую очередь относится к предельно допустимым износам и условиям эксплуатации – нагрузкам, скоростям, температуре, характеристикам окружающей среды. Только целенаправленные мероприятия по повышению износостойкости дадут наибольший эффект. Применение для этой цели разнообразных методов должно сочетаться с расчётом и анализом износа основных сопряжений, а также прогнозированием поведения изношенной системы, регламентацией скорости изнашивания. Еще на стадии проектирования должны быть заложены основы для создания износостойких и надёжных систем, сохраняющих работоспособность в различных условиях эксплуатации.

Отказы, возникающие в результате изнашивания или какого - либо другого процесса старения, принято называть постепенными (износными).

Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени от t_1 до t_2 зависит от длительности предшествующей работы системы t_1 . Чем больше по времени эксплуатировалась система, тем выше вероятность возникновения отказа, т.е. $F_2(\Delta t) > F_1(\Delta t)$, если $t_2 > t_1$, где $F(\Delta t)$ – вероятность отказа за период от t до $(t + \Delta t)$.

К числу постепенных относится большинство отказов технических систем. Они связаны с процессами износа, коррозии, усталости и ползучести материалов.

Указанные виды отказов могут с достаточной для практических целей точностью описываться теоретическими законами, которые позволяют не только выявлять основные характеристики, но и прогнозировать поведение технических систем в эксплуатации.

1.3. Законы, отражающие изменение и прекращение работоспособности технических систем

1.3.1. Отказы и неисправности технических систем, причины их возникновения

Как уже отмечалось ранее, **отказ** – случайное событие, заключающееся в полной или частичной потере работоспособности системы.

Отказы делят на *отказы функционирования*, при возникновении которых выполнение своих функций рассматриваемой технической системой или её элементом (элементами) прекращается (например, разрушение зубьев шестерни редуктора), и *отказы параметрические*, при которых некоторые параметры технической системы изменяются в недопустимых пределах (например, расход топлива у машины значительно превышает нормативный).

Повреждение – это событие, заключающееся в нарушении исправного состояния технической системы при сохранении её работоспособного состояния.

Критерии отказов и повреждений устанавливают в технической документации.

Различают также **ресурсный отказ** и **сбой**. К категории *ресурсного* относят отказ, в результате которого техническая система достигает предельного состояния. К *сбою* относят самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством (без ремонта) оператора, например, путём воздействия на органы управления и т. п.

Причины отказов делятся на *случайные* и *систематические*.

Случайные причины – это непредвиденные перегрузки, дефекты материалов деталей и погрешности их изготовления, не обнаруженные контролем. К ним могут быть отнесены ошибки обслуживающего персонала или сбои в системе управления. Случайные причины вызывают отказы преимущественно при их неблагоприятных сочетаниях.

Систематические причины – это закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений. Повреждения возникают под воздействием факторов окружающей среды, при старении материалов, функциональных сбоях, нагрузках, а также в результате работы трения.

В соответствии с указанными причинами, а также характером развития и проявления отказов, они делятся на *внезапные* (разрушения от перегрузок, заедания), *постепенные по развитию и внезапные по проявлению* (усталостные разрушения, короткие замыкания из - за старения и пробоя изоляции, перегорание ламп накаливания) и *постепенные* (износ, старение, коррозия, залипание). Внезапные отказы, вследствие своей неожиданности, опаснее отказов постепенных. Они характеризуются скачкообразным изменением значений параметров технической системы, т. е. это отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием. Чаще всего такого рода отказы связаны с разрушением элементов технических систем из - за превышения предельно допустимого уровня нагрузки на них. Наступлению же постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров технической системы, что позволяет предупредить наступление отказа или принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий.

Отказы различают по *источникам и причинам возникновения*. Возникшие по причинам недостатков (несовершенства) конструкции отказы называют *конструктивными*. *Производственными (технологическими)* называют отказы, являющиеся следствием нарушения или несовершенства технологических процессов изготовления или ремонта. *Эксплуатационные* отказы вызываются нарушением установленных правил и условий эксплуатации,

например, применением нерекондуемых сортов топлива и смазочных материалов, перегрузкой систем, несвоевременным проведением установленных технических воздействий и т. п.

Выделяют *деградационный отказ*, который обусловлен естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации технических систем.

В технических системах могут встречаться так называемые *перемежающиеся отказы*, которые могут многократно возникать и самоустраняться, например, при ослаблении и окислении контактов.

Отказы могут классифицироваться по *последствиям*, т. е. явлениям, событиям, процессам и состояниям, обусловленным наступлением неработоспособного состояния технической системы. Критериями при этом могут служить прямые и косвенные потери, вызванные отказами, затраты труда и времени на устранение последствий отказов, потеря эффективности функционирования технических систем и т. п.

При классификации отказов по последствиям выделяют несколько *категорий отказов*. При этом различают *критические* и *некритические отказы*. Некритические отказы могут быть *существенные* и *несущественные*. Границы между категориями отказов достаточно условны.

Иногда по своим последствиям отказы могут быть разделены на *легкие* – легкоустраняемые, *средние*, не вызывающие разрушений других узлов, и *тяжёлые*, вызывающие значительные вторичные разрушения, а иногда травмирование и гибель людей.

Отказы также разделяют на *полные*, исключая возможность работы технической системы до их устранения, и *частичные*, при которых техническая система может частично использоваться, например, с неполной мощностью или на пониженной скорости.

При эксплуатации любой технической системы может наступить её первый, а затем и последующие отказы. Если эти отказы предотвращаются

заблаговременным выполнением ремонта и регулировок, то критерием близости отказа является степень повреждения системы, а *отказ* воспринимается как *потенциально возможное событие*. Такие отказы принято называть **потенциальными**.

В большинстве инструкций по сбору и обработке информации о надёжности различных машин при их эксплуатации указывается, что восстановление работоспособности отдельных деталей, сопряжений и узлов, выполняемое в соответствии с правилами технического обслуживания и ремонта, не является отказом. Только потеря работоспособности изделия, при которой требуется внеочередное вмешательство ремонтного персонала, квалифицируется как отказ.

Такой подход приводит к заведомо завышенной оценке надёжности технических систем, так как не учитывает потенциальные отказы.

Для изготовителей и эксплуатационников естественным и характерным является постоянное стремление к недопущению отказов при работе машины. Это может быть достигнуто правильной организацией системы технического обслуживания и ремонта, строгим соблюдением её требований при эксплуатации машин, применением обоснованной системы управления качеством и надёжностью при производстве изделий машиностроения. В результате изделие может вообще не иметь отказов при эксплуатации, однако уровень его надёжности не будет удовлетворять разработчиков и потребителей.

По этой причине, когда речь идёт об отказах технической системы, как основной категории теории надёжности, имеются в виду, в основном, потенциально возможные, а не только фактически проявившиеся отказы.

Стремление к недопущению отказов при эксплуатации технических систем связано с определённой боязнью последствий отказов. Они могут быть самыми разнообразными – от незначительного материального ущерба до катастрофических. Эти последствия связаны с характером самого отказа (что и где отказало), а также с таким фактором как время, необходимое для устранения отказа. Играет роль возможность выполнения ремонта, т. е. возмож-

ность устранения отказа. Учитывается продолжительность существования отказа (возможность самовосстановления работоспособности системы), а также влияние данного отказа на вероятность возникновения других, более опасных отказов и т. д.

Все особенности отказов и их последствий достаточно полно можно характеризовать *допустимой вероятностью безотказной работы*, которая аккумулирует в себе и численно оценивает опасность последствий конкретного отказа. Так, например, при непродолжительном отказе и самовосстановлении работоспособности системы (при условии, что за это время не произойдет необратимых нарушений работоспособности) допускается более низкая вероятность безотказной работы, чем при «полном» отказе и более опасных последствиях. При оценке надёжности сложных технических систем не только система в целом, но и отдельные элементы должны характеризоваться допустимой вероятностью безотказной работы. Для различных технических систем применяются категории отказов, отражающие их специфику и оценивающие опасность последствий отказа.

Для каждой категории устанавливается свое значение допустимой вероятности безотказной работы $P(t)$. Чем выше требования к технической системе, тем больше допустимое значение $P(t)$. Градация технических систем по классам надёжности приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – **Классы надёжности технических систем**

Класс надёжности	0	1	2	3	4	5
Допустимое значение $P(t)$	< 0,9	≥ 0,9	≥ 0,99	≥ 0,999	≥ 0,9999	1,00

В нулевой класс входят малоответственные элементы, отказ которых остаётся практически без последствий. Для них достаточно хорошим показателем надёжности может выступать средний срок службы, наработка на отказ или параметр потока отказов.

Классы 1...4 характеризуются повышенными требованиями к безотказной работе технических систем (число девяток после запятой определяет

номер класса надёжности). В последний 5 - й класс включаются высоконадёжные элементы или технические системы в целом, отказ которых в заданный период времени эксплуатации недопустим.

Однако следует подчеркнуть, что, во - первых, данная вероятность задается для определенного периода эксплуатации T_p и, во - вторых, режимы работы и условия эксплуатации технических систем должны быть строго регламентированы.

Кроме того, для сложных технических систем, как правило, недостаточно назначить только общее значение допустимой вероятности безотказной работы $P(t)$ без дифференциации этого показателя на категории по последствиям отказа. При оценке надёжности ответственных технических систем следует кроме общего значения $P(t)$ отдельно рассчитывать вероятности безотказной работы для различных категорий отказов.

Категория последствий оценивает степень серьёзности тех последствий, к которым может привести отказ. Так, например, для летательных аппаратов применяются следующие классы, характеризующие категории последствий:

I класс – отказ не приводит к травмированию персонала;

II класс – отказ приводит к травмированию персонала;

III класс – отказ приводит к серьёзной травме или смерти;

IV класс – отказ приводит к серьёзным травмам или смерти группы людей.

Уровень опасности P_{on} – показатель, учитывающий время T_y , которое имеет в своём распоряжении персонал для устранения возникшего отказа и предотвращения возможной аварии. Чем меньше это время, тем выше степень опасности, возникающей от данного отказа. Численно уровень опасности может характеризоваться величиной

$$P_{on} = e^{-T_y}. \quad (1.34)$$

Вид отказа, который приводит к аварии технической системы без всякого предупреждения персонала ($T_y \rightarrow 0$), характеризуется высшим уровнем опасности, равным единице.

Противоположным по характеру является отказ, на устранение которого всегда имеется необходимое время ($T_y \rightarrow \infty$) и опасности аварии не возникает. В этом случае уровень опасности равен нулю.

Время T_y складывается из времени, затрачиваемого на получение сигнала о возникновении данного отказа, и времени его устранения. Поэтому большое значение имеет наличие приборов встроенной диагностики, контролирующих параметры машины и сигнальных устройств, а также специальных автоматических отключающих устройств, уменьшающих влияние отказа на возможность возникновения аварии и обеспечивающих условия, при которых персонал может устранить отказ. Допустимая вероятность отказа назначается с учётом влияния указанных факторов и в зависимости от его доли в вероятности отказа всей системы.

Рекомендуется устанавливать, по крайней мере, четыре класса вероятностей отказа данного элемента f , как доли от полной вероятности отказа технической системы F :

1 - й класс $f < 0,01F$;

2 - й класс $0,01F \leq f < 0,05F$;

3 - й класс $0,05F \leq f < 0,1F$;

4 - й класс $f > 0,1F$.

Для выявления наиболее опасных категорий отказов применяются специальные методы анализа и учёта возникающих отказов. Особенно важно оценивать параметрические отказы, так как при их возникновении возможен широкий диапазон последствий – от незначительных, практически не изменяющих работоспособность технической системы, до катастрофических.

Параметрические отказы снижают работоспособность сложных технических систем. Они выявляются применением автоматических методов контроля работоспособности, когда анализ состояния системы ведётся на основе

алгоритма, оценивающего характер сигнала об отказе. При этом выбирают лишь те категории отказов, которые связаны с основными параметрами системы.

При получении сигнала об отказе вначале необходимо его подтверждение. Это связано с возможной ошибкой оператора или неисправностью контрольно - диагностического оборудования. Затем надо учитывать, что не всегда отказ связан с выходом из строя (поломкой) какого - либо вспомогательного элемента, чаще происходит ухудшение параметров технической системы. Следует также учитывать возможности компенсирующих и корректирующих устройств, которые могут устранить влияние отказа на работоспособность системы (за счёт включения резерва, коррекции или автоматической регулировки).

Тщательный анализ и выявление всех основных видов отказов и их причин является предпосылкой для успешного решения задач, связанных с повышением работоспособности технических систем.

1.3.2. Физическая сущность законов, описывающих различные отказы технических систем

В качестве законов, описывающих различные отказы технических систем, в теории надёжности применяются различные законы распределения сроков службы (наработки) до отказа.

Закон распределения наработки технической системы до отказа, выраженный в *дифференциальной форме* в виде плотности вероятности $f(t)$ или в *интегральной форме* в виде функции распределения $F(t)$, является полной характеристикой надёжности технической системы или её элемента. Он позволяет определить вероятность безотказной работы $P(t) = 1 - F(t)$, а также математическое ожидание (средний срок службы или среднюю наработку до отказа)

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} f(t)tdt = \int_0^{\infty} P(t)dt, \quad (1.35)$$

дисперсию D или среднее квадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{D}$

$$D = \int_0^{\infty} (T_{cp} - t)^2 \cdot f(t) dt \quad (1.36)$$

и другие численные характеристики – моменты более высоких порядков, квантили. Методы определения параметров известного закона распределения рассмотрены в курсах теории вероятностей [5, 6] и не представляют принципиальных трудностей.

Основная задача теории надёжности состоит в выявлении и математическом описании такого закона распределения $f(t)$, который отражал бы с достаточно высокой достоверностью объективную действительность. Это необходимо для получения возможности прогнозировать поведение технической системы с целью оценки вероятности возникновения отказа. Наиболее простой и широко распространённый путь для решения этой задачи – непосредственный выбор закона распределения, который, по мнению исследователя, отражает действительную картину.

Законы распределения случайных величин подробно описываются в теории вероятностей. Некоторые из этих законов могут быть использованы для решения задач надёжности технических систем. Использование того или иного закона распределения и оценку его параметров обычно производят на основании опытных данных, полученных при испытании изделий или образцов, сведений об аналогах, эксплуатационных наблюдений или теоретических предпосылок.

Правомерность применения того или иного закона распределения подтверждается методами проверки статистических гипотез.

Характер изменения нагрузки и скорости относительного перемещения элементов трения при эксплуатации технических систем является случайным. К тому же наблюдается рассеяние значений исходных параметров элементов сопряжений. Поэтому правомерен вывод о том, что ресурс является величиной случайной. При оценке долговечности элементов технических систем необходимо определить вид и параметры закона распределения значе-

ний ресурса. Это необходимо выполнить с учётом режима работы сопряжений и характера процесса изнашивания.

При оценке работоспособности технических систем и отдельных элементов, эксплуатируемых на последней четверти их ресурса, широкое распространение получил **нормальный закон распределения**.

Его рекомендуют *применять при износе и других постепенных отказах*. Однако, учитывая область существования $0 \leq t < \infty$ при точных решениях, необходимо вводить нормирующий множитель, который обеспечивает равенство единице площади под кривой $f(t)$ в области положительных значений t .

Нормальное распределение является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым для практических расчётов. Нормальному распределению подчиняется наработка до отказа целого ряда восстанавливаемых и невосстанавливаемых технических систем при условии, что изменение их технического состояния в эксплуатации происходит под влиянием многих примерно равнозначных факторов.

Хорошее согласование с нормальным законом распределения обеспечивает непрерывный, монотонный характер развития процесса изнашивания большинства элементов технических систем во времени. Дисперсия значений износа определяется точностью изготовления элементов технических систем и скоростью их изнашивания, значения которых также распределены по нормальному закону.

Распределение имеет два независимых параметра: математическое ожидание наработки m_t и среднее квадратическое отклонение σ .

Значения параметров m_t и σ оценивают по результатам испытаний технических систем по формулам:

$$m_t \approx \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}; \quad (1.37)$$

$$\sigma = \sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}{N-1}} \quad (1.38)$$

где \bar{t} и σ^* – оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения наработки.

Математическое ожидание определяет на графике положение кривой Гаусса, а среднее квадратическое отклонение – ширину этой кривой.

Кривая плотности распределения начинается от $t = -\infty$, распространяется до $t = +\infty$ и тем острее и выше, чем меньше σ . Это не является существенным недостатком, особенно если $m_t \geq 3\sigma$, так как площадь, очерченная уходящими в бесконечность ветвями кривой плотности, выражающая соответствующую вероятность отказов, очень мала. Например, вероятность отказа за период времени $(m_t - 3\sigma)$ составляет всего 0,135 % и обычно в расчётах не учитывается. Вероятность отказа до $(m_t - 2\sigma)$ равна 2,175 %. Наибольшая ордината кривой плотности распределения равна $0,399 / \sigma$.

Интегральная функция распределения $F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt$ определяет изменение вероятности отказа технических систем.

Вероятность безотказной работы технической системы $P(t)$ может быть определена (согласно теореме о сумме вероятностей несовместных событий) как $P(t) = 1 - F(t)$.

Сравнивая технические системы с одинаковой средней наработкой до отказа и разными значениями среднего квадратического отклонения σ , необходимо отметить, что хотя при больших σ и имеются экземпляры с большой долговечностью, но чем меньше σ , тем значительно лучше техническая система.

Для элементов технических систем, отказ которых происходит в результате изнашивания, обычно устанавливается предельная величина износа I_n , по достижении которой нарушается работоспособность сборочной единицы или технической системы в целом. Ресурс сопряжения T в этом случае можно определить по формуле при условии, что начальный износ отсутствует:

$$T = \left(\frac{I_n}{b}\right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1.39)$$

где b – постоянный коэффициент, зависящий от режима работы сопряжения;
 α – показатель степени, зависящий от вида сопряжения и характера изнашивания.

Вычислительные операции с нормальным распределением проще, чем с другими, поэтому им часто заменяют другие распределения. При малых значениях коэффициента вариации σ / m_t нормальное распределение хорошо заменяет биномиальное, пуассоново и логарифмически - нормальное.

Однако в практике эксплуатации технических систем часто наблюдаются именно асимметричные законы распределения. В этих случаях могут подойти логарифмически - нормальное распределение, закон Вейбулла, гамма - распределение, распределение Релея. Они часто применяются, например, при оценке результатов испытаний на усталостную прочность, а также при описании отказов, происходящих вследствие накопления усталостных изменений и старения материалов.

В логарифмически - нормальном распределении логарифм случайной величины распределяется по нормальному закону. Как распределение положительных величин оно несколько точнее, чем нормальное, описывает наработку до отказа элементов, подвергающихся износу при действии значительных динамических и знакопеременных нагрузок. Его успешно применяют для описания наработки подшипников скольжения (коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания), а также некоторых подшипников качения, электронных приборов в системах электрооборудования и других элементов технических систем.

Логарифмически - нормальное распределение удобно для случайных величин, представляющих собой произведение значительного числа случайных исходных величин. Это подобно тому, как нормальное распределение удобно для суммы случайных величин.

Распределение имеет два независимых параметра, оцениваемых по результатам испытаний: μ и σ . Так, при испытаниях N изделий до отказа

$$\mu \approx \mu^* = \frac{\sum_{i=1}^N \ln t_i}{N}, \quad \sigma_t \approx \sigma_t^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln t_i - \mu^*)^2}{N-1}} \quad (1.40)$$

где μ^* и σ_t^* – оценки параметров μ и σ_t .

Математическое ожидание наработки до отказа

$$m_t = e^{\mu + \sigma_t^2/2}; \quad (1.41)$$

коэффициент вариации

$$v_t = \frac{\sigma_t}{m_t} = \sqrt{e^{\sigma_t^2} - 1}. \quad (1.42)$$

При $v_t \leq 0,3$ полагают $v_t \approx \sigma_t$, при этом ошибка $\leq 1\%$.

Вероятность безотказной работы можно определить в зависимости от значения квантили $u_p = (\ln t - \mu) / \sigma_t$.

Распределение Вейбулла - Гнеденко является достаточно универсальным, охватывает при варьировании параметров широкий диапазон случаев изменения вероятностей. Наряду с логарифмически - нормальным распределением оно удовлетворительно описывает наработку до отказа элементов технических систем по усталостным разрушениям, а также из - за старения материалов. Наиболее полно свойства этого распределения проявляются в модели так называемого «слабого звена». Если техническая система состоит из группы независимых элементов, отказ или неисправность каждого из которых приводит к отказу всей системы, то вероятность её безотказной работы определяется предельным распределением для крайних членов последовательности взаимонезависимых величин.

Следовательно, в данной модели рассматривается распределение времени (или наработки) достижения предельного состояния системы как распределение соответствующих минимальных значений t_i отдельных элементов $t_c = \min(t_1, t_2, \dots, t_n)$. Функция распределения величины t_c может быть выражена следующей зависимостью:

$$Fn(t) = P(t_c < t) = 1 - P(t_1 \geq t, t_2 \geq t \dots t_n \geq t). \quad (1.43)$$

Примером использования распределения Вейбулла - Гнеденко является распределение ресурса или интенсивности изменения параметра техническо-

го состояния изделий, механизмов, деталей, которые состоят из нескольких элементов, составляющих цепь.

Например, ресурс подшипников качения ограничивается одним из элементов (шарик или ролик, обойма, конкретный участок сепаратора и т. д.) и описывается указанным распределением.

По аналогичной схеме происходит разрегулирование тепловых зазоров в механизмах газораспределения двигателей. Ряд изделий при анализе модели отказа может быть рассмотрен как состоящий из нескольких элементов (участков): прокладки, уплотнения, шланги, трубопроводы, приводные ремни и т. д. Разрушение указанных изделий происходит в разных местах и при разной наработке. Однако ресурс изделия в целом определяется наиболее слабым его участком (звеном), т. е. $t_c = \min(t_1, t_2, \dots, t_n)$.

Таким образом, распределение Вейбулла - Гнеденко достаточно широко используется для оценки надёжности элементов различных технических систем, в частности автомобилей, подъёмно - транспортных, строительно - дорожных и других машин.

Распределение Вейбулла - Гнеденко также имеет два параметра: параметр формы $m > 0$ и параметр масштаба $a > 0$.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение соответственно

$$m_t = b_m \cdot a^{1/m}; \quad \sigma = c_m \cdot a^{1/m}, \quad (1.44)$$

где b_m и c_m – коэффициенты.

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{m}{a} \cdot t^{m-1}; \quad (1.45)$$

вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-t^{m/a}}. \quad (1.46)$$

Если в течение времени отказы не наступают, то формулы (1.45) и (1.46) для характеристик надёжности несколько модифицируются. Так, вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\frac{(t-t^*) \cdot m}{a}}. \quad (1.47)$$

Возможности и универсальность распределения Вейбулла - Гнеденко проявляются исходя из следующих пояснений.

При $m < 1$ функции $\lambda(t)$ и $f(t)$ от наработки до отказа убывающие.

При $m = 1$ распределение Вейбулла - Гнеденко превращается в экспоненциальное, для которого $\lambda(t) = const$ и $f(t)$ – убывающая функция.

При $m > 1$ функция $f(t)$ – одновершинная, функция $\lambda(t)$ непрерывно возрастающая при $1 < m < 2$ с выпуклостью вверх, а при $m > 2$ – с вогнутостью вниз.

При $m = 2$ функция $\lambda(t)$ является линейной и распределение Вейбулла - Гнеденко превращается в так называемое распределение Релея.

При $m = 3,3$ распределение Вейбулла - Гнеденко близко к нормальному.

Надёжность технической системы из последовательно соединённых одинаковых элементов, отказы которых подчиняются распределению Вейбулла, также подчиняется распределению Вейбулла.

Надёжность технических систем в период нормальной эксплуатации оценивается с помощью **экспоненциального закона распределения времени безотказной работы**. В этот период постепенные отказы ещё не проявляются, и надёжность характеризуется внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность $\lambda(t) = \lambda = const$, которая не зависит от возраста технической системы. $\lambda = 1 / m_t$, m_t – средняя наработка до отказа (обычно в часах). Таким образом, λ выражается числом отказов в час и, как правило, составляет малую дробь.

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t}. \quad (1.48)$$

Она одинакова за любой одинаковый промежуток времени в период нормальной эксплуатации.

Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать время безотказной работы широкого круга технических систем: особо ответственных машин, эксплуатируемых в период по окончании приработки и до существенного проявления постепенных отказов; машин с последовательной заменой отказавших деталей; элементов радиоэлектронной аппаратуры; машин вместе с электро- и гидрооборудованием и системами управления. Это может быть выполнено и для других сложных технических систем, состоящих из большого числа элементов, при этом время безотказной работы каждого может не быть распределено по экспоненциальному закону; нужно только чтобы отказы одного элемента, не подчиняющиеся этому закону, не доминировали над другими.

Примерами неблагоприятного сочетания условий работы элементов технических систем, вызывающих их внезапный отказ (поломку), могут быть следующие. Для вала это может проявиться действием максимальной пиковой нагрузки при положении наиболее ослабленных предельных волокон материала вала в плоскости нагрузки.

Для зубчатой передачи это может быть действием максимальной пиковой нагрузки на наиболее слабый зуб при его зацеплении в вершине и при взаимодействии с зубом сопряжённого колеса, при котором погрешности шагов сводят к минимуму или исключают участие в работе второй пары зубьев. Такой случай может встретиться только через много лет эксплуатации или не встретиться совсем.

Существенным достоинством экспоненциального распределения является его простота: оно имеет только один параметр.

Если, как обычно, $\lambda(t) \leq 0,1$, то формула для определения вероятности безотказной работы упрощается в результате разложения в ряд и отбрасывания малых членов:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t \quad (1.49)$$

Значения вероятности безотказной работы в зависимости от величины отношения t / m_i :

t / m_t	1,000	0,1	0,01	0,001	0,0001;
$P(t)$	0,368	0,9	0,99	0,999	0,9999.

Так как при $t / m_t = 1$ вероятность $P(t) \approx 0,37$, то 63 % отказов возникает за время $t < m_t$ и только 37 % позднее. Из приведённых значений следует, что для обеспечения требуемой вероятности безотказной работы 0,9 или 0,99 можно использовать только малую долю срока службы технической системы (соответственно 0,1 и 0,01).

При эксплуатации технических систем с различными режимами нагружения меняются и интенсивности их отказов, т. е. за время t_1 $\lambda = \lambda_1$, за время t_2 соответственно $\lambda = \lambda_2$, а вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}. \quad (1.50)$$

Эта зависимость следует из теоремы умножения вероятностей.

Для определения на основе результатов испытаний величины интенсивности отказов оценивают среднюю наработку до отказа

$$m_t = \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1.51)$$

где N – общее число наблюдений.

Тогда $\lambda = \frac{1}{\bar{t}}$.

Используя экспоненциальный закон распределения, несложно определить среднее число изделий n , которые выйдут из строя к заданному моменту времени, и среднее число изделий N_p , которые останутся работоспособными. При $\lambda(t) \leq 0,1$ $n \approx N \cdot \lambda(t)$; $N_p \approx N \cdot (1 - \lambda t)$.

При оценке работоспособности технических систем наиболее широко используются, как правило, те законы распределения, которые за счёт изменения значений численных параметров могут принимать различный вид. Это было показано на примере распределения Вейбулла - Гнеденко. То же можно сказать и о *гамма - распределении*. Поэтому такие законы обладают большей гибкостью и могут отражать разнообразные причины отказов.

Контрольные вопросы

1. Что такое техническая система?
2. Какими основными свойствами обладают технические системы?
3. Каким образом оценивается работоспособность технических систем?
4. Какими показателями оценивают безотказность технических систем?
5. Оценка работоспособности технических систем с помощью комплексных показателей надёжности.
6. Между какими показателями устанавливает связь основная формула теории надёжности?
7. Какие основные причины приводят к потере работоспособности технических систем?
8. Какие конструктивно - технологические факторы оказывают влияние на обеспечение работоспособности технических систем?
9. Что входит в комплекс эксплуатационных факторов, определяющих условия функционирования технических систем?
10. С помощью, каких законов отражается изменение и прекращение работоспособности технических систем?
11. Почему надёжность технических систем в период нормальной эксплуатации оценивается с помощью экспоненциального закона?
12. Какие законы позволяют оценивать надёжность технических систем на последней четверти их ресурса?

Литература

1. Шейнин А.М. Закономерности влияния надежности машин на эффективность их эксплуатации. – М. : Знание, 1987. – 54 с.
2. Эксплуатация дорожных машин: Учебник для вузов / А.М. Шейнин, Б.И. Филиппов, В.А. Зорин и др. – М.: Транспорт, 1992. – 328 с.
3. Озорнин С.П. Техническая эксплуатация строительно - дорожных и коммунальных машин. Основы маркетинга: Учеб. пособие. – Чита: ЧитГТУ, 2002. – 97 с.
4. Российская энциклопедия самоходной техники: Справочное и учебное пособие для специалистов отрасли «Самоходные машины и механизмы»; Т. 2. Основы эксплуатации и ремонта самоходных машин и механизмов. – М. : Просвещение, 2001, - 358 с.
5. Решетов Д.Н. и др. Надёжность машин: Учеб. пособие для вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Закономерности изменения работоспособности технических систем.....	6
1.1. Терминология, основные понятия и определения.....	6
1.2. Влияние различных факторов на работоспособность технических систем.....	34
1.2.1. Конструктивно - технологические факторы влияния.....	35
1.2.2. Комплекс эксплуатационных факторов влияния.....	40
1.3. Законы, отражающие изменение и прекращение работоспособности технических систем.....	44
1.3.1. Отказы и неисправности технических систем, причины их возникновения.....	44
1.3.2. Физическая сущность законов, описывающих различные отказы технических систем.....	52
Контрольные вопросы.....	62
ЛИТЕРАТУРА.....	63

Ильин Пётр Иванович

**ОСНОВЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Молодёжный, 2020

Учебное пособие

для студентов инженерного факультета
направление подготовки 23.03.03 Эксплуатация
транспортно - технологических машин и комплексов,
35.03.06 Агроинженерия