

# ТЕМА4 ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ



## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

- **Надежность** – одно из свойств качества продукции, или свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.
- **Изделие** – единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться в штуках (экземплярах), к изделиям допускается относить законченные и незаконченные предметы производства, в том числе заготовки;
- **Элемент** – простейшая при данном рассмотрении составная часть изделия (в задачах надежности может состоять из многих деталей);
- **Система** – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

- Изделия подразделяются на **невосстанавливаемые**, которые не могут быть восстановлены потребителем и подлежат замене, например, элементы радиоэлектронной аппаратуры (диоды, микросхемы), резинотехнические изделия (манжеты, уплотнительные кольца), детали механических узлов (подшипники, валы, шестерни и т. д.) и **восстанавливаемые**, которые могут быть восстановлены потребителем (например, автомобиль).



Изделие машиностроения, с точки зрения надежности, может находиться в одном из следующих состояний:

- **Исправное состояние** – состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.
- **Неисправное состояние** – состояние изделия, при котором оно не удовлетворяет хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.
- **Работоспособное состояние** – состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.
- **Неработоспособное состояние** – состояние изделия, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего его способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.
- **Предельное состояние** – состояние изделия, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Надежность изделия характеризуется также следующими основными **событиями**:

- **Отказ** – событие, заключающееся в полной или частичной утрате изделием работоспособности.
- Отказы делят на **отказы функционирования**, при которых выполнение своих функций рассматриваемым элементом или изделием прекращается (например, поломка зубьев шестерни), и **отказы параметрические**, при которых некоторые параметры изделия изменяются в недопустимых пределах (например, потеря точности станка).



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

- **Случайные причины** – это непредусмотренные перегрузки, дефекты материала и погрешности изготовления, не обнаруженные контролем, ошибки обслуживающего персонала или сбои системы управления. Например: твердые включения в обрабатываемую среду, крупные неровности дороги, наезды на препятствия, недопустимые отклонения размеров заготовок или их неправильный зажим, раковины, закалочные трещины. Случайные факторы преимущественно вызывают отказы при действиях в неблагоприятных сочетаниях.
- **Систематические причины** – это закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений: влияние окружающей среды, времени, температуры, облучения, коррозия, старение, нагрузки и работа трения, усталость, ползучесть, износ, функциональные воздействия – засорения, залипания, утечки.

В соответствии с этими причинами и характером развития и проявления отказы делят на:

- **Внезапные** – поломки от перегрузок, заедания;
- **Постепенные по развитию и внезапные по проявлению** усталостные разрушения, перегорание ламп, короткие замыкания из-за старения изоляции;
- **Постепенные** – износ, старение, коррозия, залипание.

Внезапные отказы, вследствие своей неожиданности, более опасны, чем постепенные. Постепенные отказы представляют собой выходы параметров за границы допуска в процессе эксплуатации или хранения.



## По причинам возникновения отказы можно также разделить на:

- **Конструкционные** – вызванные недостатками конструкции изделия;
- **Технологические** – вызванные несовершенством или нарушением технологии изготовления или ремонта изделия;
- **Эксплуатационные** – вызванные неправильной эксплуатацией изделия.

Отказы в соответствии со своей *физической природой* бывают связаны с разрушением деталей или их поверхностей (поломки, выкрашивание, износ, коррозия, старение) или не связаны с разрушением (засорение каналов подачи топлива, смазки или подачи рабочей жидкости в гидроприводах, ослабление соединений, загрязнение или ослабление электроконтактов). В соответствии с этим отказы устраняют либо заменой дефектных деталей, либо регулированием сопряжений или очисткой.

**По своим последствиям отказы могут быть:**

- **легкими** – легкоустраняемыми;
- **средними** – не вызывающими разрушений других узлов;
- **тяжелыми** – вызывающими тяжелые вторичные разрушения, а иногда и человеческие жертвы.

**По возможности дальнейшего использования изделия отказы разделяют на:**

- **полные** – исключающие возможность работы изделия до их устранения;
- **частичные** – при которых изделие может частично использоваться, например, с неполной мощностью или на пониженной скорости.



## По сложности устранения различают отказы:

- **устранимые в порядке технического обслуживания;**
- **устранимые в порядке среднего или капитального ремонта;**
- **устранимые в эксплуатационных и стационарных условиях**, что особенно существенно для транспортных машин, в частности для автомобилей.

Встречаются также **самоустраняющиеся отказы**, например, в системах автоматической подачи заготовок на станках.

По времени возникновения отказы делят на:

- **прирабочные** – возникающие в первый период эксплуатации, связанные с отсутствием приработки и с попаданием на сборку дефектных элементов, не отбракованных контролем;
- **при нормальной эксплуатации** – за период до проявления износных отказов;
- **износные;**

- Надежность является **комплексным свойством** и включает в себя такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. В зависимости от вида изделия его надежность может включать только часть составных свойств надежности. Так, если изделие невосстанавливаемое, то для такого изделия в свойство надежности не включается долговечность и ремонтпригодность – для него важно только свойство безотказности.
- **Безотказность** (или надежность в узком смысле слова) – свойство непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение заданного времени или наработки. Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей или с перерывом в работе большого комплекса машин, с остановкой автоматизированного производства или с браком дорогого изделия.
- **Долговечность** – свойство изделия длительно сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. Предельное состояние изделия характеризуется невозможностью его дальнейшей эксплуатации, снижением эффективности или безопасности. Для невосстанавливаемых изделий понятия долговечности и безотказности практически совпадают.

- **Ремонтопригодность** – свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособности путем технического обслуживания и ремонтов. С усложнением систем все труднее становится находить причины отказов и отказавшие элементы. Так, в сложных электрогидравлических системах станков поиск причин отказа может занимать более 50% общего времени восстановления работоспособности.
- **Сохраняемость** – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение хранения и (или) транспортирования. Практическая роль этого свойства особенно велика для приборов. Так, по американским источникам во время второй мировой войны около 50% радиоэлектронного оборудования для военных нужд и запасных частей к нему вышло из строя в процессе хранения.

# СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Внезапные отказы определяются случайными неблагоприятными сочетаниями нескольких факторов. Случайность связана с тем, что причины события остаются для нас скрытыми.
- Каждая случайная величина имеет ряд значений, которые возникают с определенной вероятностью. В этом случае распределение случайной величины представляет собой перечисление ее возможных значений с указанием их вероятностей.
- Случайные величины могут носить **прерывный** (или дискретный) и **непрерывный** характер.
- Дискретная случайная величина может принимать лишь определенные значения, которые отделены друг от друга конечными интервалами.
- Случайная величина, принимающая все значения из некоторого интервала, называется непрерывной.

- Для характеристики случайной величины необходимо знать не только ее возможные значения, но и насколько часто появляются различные значения этой величины. Частоту появления случайной величины лучше всего характеризовать вероятностью отдельных ее значений, то есть для случайной величины  $X$  следует указывать не только ее значения  $x_1, x_2, \dots$ , но и вероятность событий  $X=x_j$ .
- Закон распределения дискретной случайной величины чаще всего имеет табличную форму изложения, где перечисляются все возможные значения случайной величины и вероятности, с которыми они возникают. Для наглядности ряд распределения изображают графически, откладывая в прямоугольной системе координат по оси абсцисс возможные значения случайной переменной, а по оси ординат их вероятности. При графическом изображении образуется полигон распределения, или эмпирическая кривая распределения, которая служит одной из форм закона распределения.

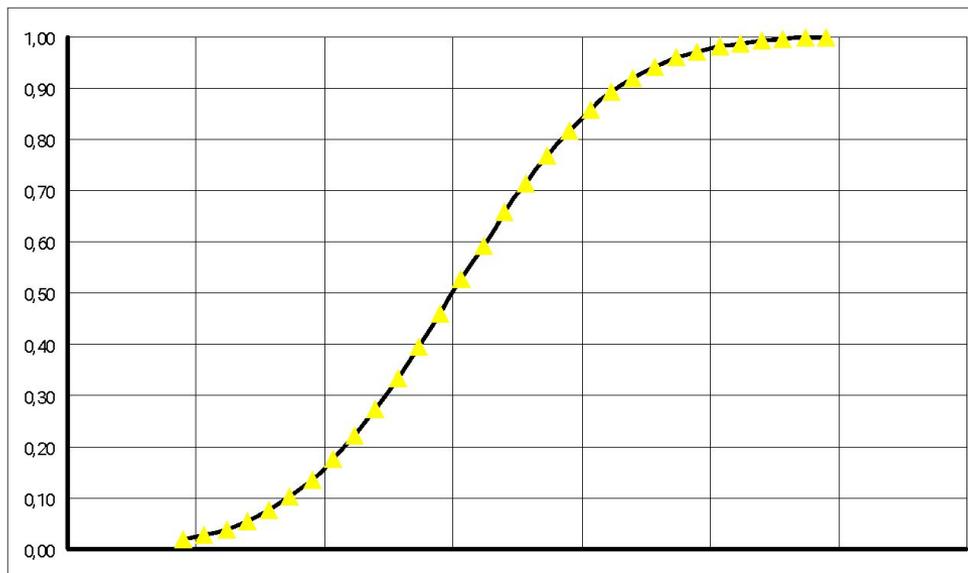
- Дискретная и непрерывная случайные величины имеют бесконечное множество значений, перечислить которые невозможно. Поэтому здесь рассматриваются вероятности  $P$  событий случайной величины, когда  $X < x$ , где  $x$  – некоторая текущая переменная (реализация случайной величины  $X$ ).
- Вероятность того, что  $X < x$ , зависит от текущей переменной  $x$  и является функцией от  $x$ . Она обозначается  $F(x)$  и записывается символическим выражением:

$$F(x) = P(X < x) .$$

$$F(x) = P(X < x) .$$

- Эта функция называется функцией распределения и служит одной из форм выражения закона распределения случайной величины. Данная универсальная характеристика может применяться как для прерывных, так и для непрерывных случайных величин,  $F(x)$  называется также интегральным законом распределения, который имеет ряд свойств:
- 1.  $F(x)$  всегда неотрицательная функция, т.е.  $F(x) \geq 0$ .
- 2. Поскольку вероятность не может принимать значения больше 1, то  $0 \leq F(x) \leq 1$ .
- 3. Так как  $F(x)$  – неубывающая функция, то при  $x_2 > x_1$  и  $F(x_2) > F(x_1)$ .
- 4. Предельное значение функции распределения при  $x \rightarrow -\infty$  равно 0, а при  $x \rightarrow +\infty$  равно 1.

а)

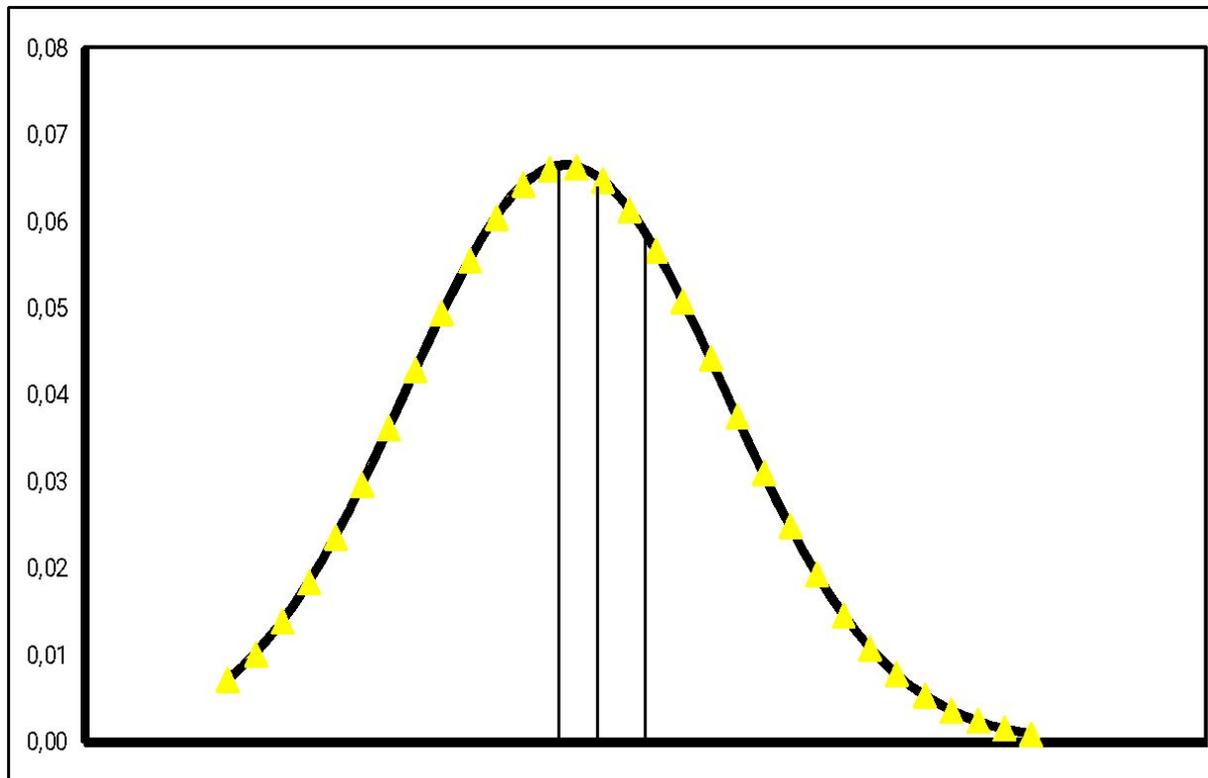


б)



а) интегральная  
функция  
распределения и  
б) дифференциальная  
функция (плотность)  
распределения  
случайной величины  $X$

- В ряде случаев, распределение случайной величины достаточно характеризовать некоторыми числовыми величинами: математическим ожиданием (средним значением), модой и медианой, характеризующими положение центров группирования случайных величин по числовой оси.
- **Математическое ожидание**  $m_x$  – это число, вокруг которого сосредоточены значения случайной величины **X**.



# ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

- Показатели надежности различаются в соответствии с компонентами надежности на *показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости*.
- По восстанавливаемости изделий они делятся на показатели для *восстанавливаемых и невосстанавливаемых* изделий.
- Применяют *относительные* показатели, характеризующие общий уровень надежности, и *абсолютные* или *числовые* показатели, характеризующие отдельные типоразмеры машин.
- По способу получения различают показатели: *расчетные*, получаемые на основе расчетных методов, *экспериментальные* – определяемые по данным испытаний; *эксплуатационные*, получаемые по данным эксплуатации; *экстраполированные*, найденные на основании расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

- По области использования показатели надежности подразделяются на нормируемые и оценочные.
- **Нормируемым** называют показатель надежности, значение которого регламентировано нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.
- К **оценочным** относятся фактические значения показателей надежности опытных образцов и серийной продукции, получаемые по результатам испытаний и эксплуатации.

- По области распространения показатели надежности подразделяются на индивидуальные и групповые.
- **К индивидуальным** относятся такие показатели надежности, используя которые можно по результатам испытаний или эксплуатации сделать вывод, соответствует или не соответствует данное изделие регламентированным требованиям по надежности.
- **К групповым**, относятся такие показатели надежности, используя которые можно по результатам испытаний или эксплуатации делать вывод, соответствует или не соответствует партия изделий регламентированным требованиям по надежности.
- **Единичные** показатели характеризуют одно из свойств надежности и в зависимости от этого подразделяются на показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.
- **Комплексные** показатели характеризуют одновременно несколько свойств.
- Надежность изделий в зависимости от их вида может оцениваться частью или всеми показателями надежности.

## Показатели безотказности:

- **Вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникнет.

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

где  $N_p$  – число работоспособных изделий к концу времени  $t$  испытаний или эксплуатации;

$N$  – число изделий, поставленных на испытания или эксплуатацию;

$n(t)$  – число изделий, отказавших к концу времени  $t$  испытаний или эксплуатации.

- Распределение отказов во времени характеризуется *функцией плотности распределения*  $f(t)$  наработки до отказа.

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{N\Delta t}$$

где  $\Delta n(t)$  – приращение числа отказавших изделий за время  $\Delta t$ .

- **Критерием отказа** называют признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической или конструкторской документации.
- **Средняя наработка на отказ** – это отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.
- **Средняя наработка до отказа** – это математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.
- **Средняя наработка между отказами** – это математическое ожидание наработки объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

На стадии серийного изготовления показатели безотказности определяют с целью контроля их нормируемых значений через определенные промежутки календарного времени.

## Показатели долговечности:

- **Средний ресурс** – математическое ожидание ресурса.
- **Гамма-процентный ресурс** представляет собой наработку, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.
- **Назначенный ресурс** – суммарная наработка, при достижении которой применение объекта по назначению должно быть прекращено независимо от его технического состояния.
- Под **установленным ресурсом** понимается технически обоснованная или заданная величина ресурса, обеспечиваемая конструкцией, технологией и эксплуатацией, в пределах которой объект не должен достигать предельного состояния.

## Комплексные показатели:

К комплексным показателям относятся коэффициенты: готовности, технического использования и оперативной готовности.

- **Коэффициент готовности ( $K_2$ )** – вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.
- **Коэффициент технического использования** – отношение математического ожидания наработки объекта за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий наработки, продолжительности технических обслуживаний, плановых ремонтов и unplanned восстановлений за тот же период эксплуатации.
- **Коэффициент оперативной готовности** – вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с момента времени  $t_0$ , объект будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

## Общие зависимости:

- Существенное рассеяние основных параметров надежности предопределяет необходимость рассматривать ее в вероятностном аспекте.
- Как выше было показано на примере характеристик распределений, параметры надежности используются в статистической трактовке для оценки состояния и в вероятностной трактовке для прогнозирования. Первые выражаются в дискретных числах, их в теории вероятностей и математической теории надежности называют оценками. При достаточно большом количестве испытаний они принимаются за истинные характеристики надежности.
- относительное количество отказов:

$$Q(t) = \frac{n}{N}$$

Если испытание проводится как выборочное, то  $Q$  можно рассматривать как статистическую оценку вероятности отказа или, если  $N$  достаточно велико, как вероятность отказа.

# НАДЕЖНОСТЬ – ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА МАШИН

- **Качество машин** – совокупность их свойств, обуславливающих пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.
- Оно имеет различные аспекты – технический, экономический, социологический и др.
- Показатели **назначения** характеризуют степень соответствия машины целевому назначению, ее технические и эксплуатационные возможности.
- Показатели **надежности** определяют способность машины выполнять заданные функции в течение требуемого промежутка времени.
- **Эргономические** показатели учитывают ее приспособленность к антропометрическим, биомеханическим, физиологическим и инженерно-психологическим свойствам человека, проявляющимся в производственных процессах.
- **Эстетические** показатели определяются уровнем художественного конструирования, отражающим функциональность, гармоничность формы и товарный вид.

- **Патентно-правовые** показатели характеризуют весомость новых изобретений, реализованных в автомобиле.
- **Производственно-технологические** показатели учитывают затраты общественного труда на производство машин.

Все показатели надежности связаны и в значительной степени определяют показатели использования и затраты денежных средств на выполнение работ. Уровень использования машин оценивается по сменной наработке или наработке за 1 ч сменного времени; годовой наработке; использованию фонда рабочего времени; удельным затратам на техническое обслуживание и ремонт; прямым эксплуатационным затратам; выполнению работ в оптимальные сроки.



# ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЯ

Эксплуатация автомобилей индивидуального пользования по сравнению с автомобилями общего пользования имеет ряд особенностей, к числу которых относятся следующие:

- меньшая интенсивность эксплуатации;
- меньшие скорости движения и нагрузки;
- длительные простои в условиях безгаражного хранения;
- значительно больший срок службы автомобилей;
- пробеги на большие расстояния в летнее время года;
- более низкая средняя квалификация водителей;
- более тщательный внешний уход за автомобилями;
- частичное проведение технического обслуживания и ремонта автомобилей силами водителей.

Испытания на надёжность могут проводиться в стендовых, полигонных и эксплуатационных условиях, а по целевому назначению они подразделяются на исследовательские и контрольные.

- **Стендовые** испытания агрегатов или автомобиля позволяют в стационарных условиях вести приборные наблюдения за процессом изменения технического состояния и получить необходимые данные для определения показателей отдельных свойств надёжности.
- **Полигонные** испытания опытных и серийных образцов автомобильной техники проводятся на полигонах автозаводов и НАМИ (Научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт). Это позволяет в достаточно короткие сроки получить достоверные результаты по надёжности, выявить недолговечные элементы.
- **Эксплуатационные** испытания автомобилей на надёжность имеют особую значимость. Они проводятся в опорных автотранспортных предприятиях (ОАТП) или экспериментальных производственных автохозяйствах (ЭПАХ), а налаженная система учёта за подконтрольными транспортными средствами (отказами, повреждениями, износами и причинами их появления) ведётся в реальных условиях использования автомобилей на перевозках.

## Влияние качества технического обслуживания и ремонта на надёжность изделия:

При эксплуатации автотранспортных средств на грузовых и пассажирских перевозках агрегаты и узлы их подвергаются внешним и внутренним воздействиям, приводящим к потере работоспособности.

- Внешнее воздействие проявляется в том, что автомобиль воспринимает все статические и динамические нагрузки, ветровое, температурное, солнечное и биологическое влияние.
- Все они являются случайными событиями, а природа их возникновения связана с множеством факторов и сложными физическими явлениями.
- Все воздействия вызывают ухудшение выходных параметров функционирования агрегатов автомобиля. По скорости протекания процессов, снижающих работоспособность, они делятся на быстро протекающие, средней скорости и медленные.

- Ухудшение технического состояния происходит и тогда, когда автомобиль не используется в перевозочном процессе, так как согласно второму закону термодинамики о тенденциях упорядоченных систем к самопроизвольному разрушению его техническое состояние будет ухудшаться от номинального до предельного.
- К постоянно действующим причинам ухудшения технического состояния автомобиля относятся процессы функционирования
- К эпизодическим причинам ухудшения технического состояния относятся конструктивные отказы в автомобиле, не обеспечение качественного обслуживания, нарушение режимов ТО и ТР, неумелое вождение, неблагоприятные дорожные условия, аварийные ситуации движения, воздействие природных явлений и др.
- Внешние и внутренние воздействия ведут к постепенному расходованию потенциальных возможностей автомобиля, а при техническом воздействии энергия затрачивается на восстановление утраченной работоспособности.

Задача определения оптимальных моделей поддержания технического состояния автомобилей в работоспособном состоянии должна рассматриваться как задача оптимального управления случайными процессами.

Известны следующие модели:

- с принудительной заменой отдельных составляющих машины после истечения определённой наработки (по наработке);
- по величине параметра функционирования с учётом прогноза (по состоянию).
- Первая модель (**по наработке**) широко применяется для изделий особо важной значимости. Эта модель находит ограниченное применение на автомобильном транспорте: для систем, обеспечивающих безопасность движения транспортных средств, занятых особо важными пассажирскими и грузовыми перевозками.
- Вторая модель (**по состоянию**) представляет наибольший интерес. Сущность её состоит в измерении выходных и сопутствующих параметров технического состояния и в формировании на этой основе заключения о том, что конкретно нужно сделать данному агрегату, системе или автомобилю в целом для обеспечения эксплуатационной надёжности. Модель эта является дальнейшим развитием теории надёжности, уточняющей техническое состояние приборной информацией, связанной с данными физико-механических свойств конкретного объекта.

# НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЯ В ПЕРИОД НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

- В этот период постепенные отказы еще не проявляются и надежность характеризуется внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от возраста изделия:
- Вероятность безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы и одинакова за любой одинаковый промежуток времени в период нормальной эксплуатации.
- Существенное достоинство экспоненциального распределения – его простота: оно имеет только один параметр.
- Используя экспоненциальный закон распределения, несложно определить среднее число изделий, которые выйдут из строя к заданному моменту времени, и среднее число изделий которые останутся работоспособными.

## НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЯ В ПЕРИОД ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ

- Для постепенных отказов (износных) нужны законы распределения времени безотказной работы, которые дают вначале низкую плотность распределения, затем максимум и далее падение, связанное с уменьшением числа работоспособных элементов.
- В связи с многообразием причин и условий возникновения отказов в этот период для описания надежности применяют несколько законов распределений, которые устанавливают путем аппроксимации результатов испытаний или наблюдений в эксплуатации.
- Нормальное распределение является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым для практических расчетов.
- Нормальному распределению подчиняется наработка многих восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, ошибки измерений деталей и т. д.
- Распределение суммы независимых случайных величин  $U = X + Y + Z$ , называемое композицией распределений, при нормальном распределении слагаемых также является нормальным распределением.

# СТАРЕНИЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

- ***Окружающая среда.*** Объект всегда погружен в «среду», которую можно определить, как совокупность всех параметров, не являющихся частью объекта. В этом случае среда будет включать нагрузку, приложенную к объекту.
- ***Средой для данного объекта называются все факторы, являющиеся внешними по отношению к этому объекту, за исключением рассматриваемой нагрузки.***
- Среда включает в себя группу материалов и группу энергий. Материалы и энергия среды могут быть взаимно связаны или же нет.
- Влияния потоков материалов в сторону объекта и из него по существу идентичны. Каждый из них приводит к появлению новых «нестандартных» звеньев в объекте. Эти новые звенья могут быть либо слабее, либо прочнее стандартных звеньев.

