

ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ

Лекции –лектор Андрюшин Александр Васильевич, зав. кафедрой АСУТП-
понедельник 4 пара 15:35-17:10 ауд. Б-205

Практические занятия

- вторник (I нед.) 2 пара каф.АСУТП лаб. ПЭВМ**
- вторник (II нед.) 1 пара каф.АСУТП лаб. ПЭВМ**
- вторник (II нед.) 3 пара каф.АСУТП лаб. ПЭВМ**

Литература

В.С. Балакирев Надежность систем автоматизации. Саратов 2006.

М.А. Ястребенецкий, Г.М. Иванова Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. Москва 1989.

А.М. Половко, С.В. Гуров Основы теории надежности. Санкт-Петербург 2008.

Черкесов.Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: Учебное пособие — СПб.: Питер, 2005.

Матвеевский В.Р. Надежность технических систем. Учебное пособие. Московский государственный институт электроники и математики. М., 2002.

- Необходимо получать и перерабатывать в реальном масштабе времени значительный объем информации о параметрах и состоянии технологического оборудования (15-20 тыс. измеряемых и контролируемых параметров на атомных блоках).
- Увеличение количества и сложности аппаратуры автоматики вызывает непрерывный рост затрат на эксплуатацию, резко увеличиваются при использовании ненадежной аппаратуры.

ВВЕДЕНИЕ В НАДЕЖНОСТЬ

Установление и достижение требуемого уровня надежности разрабатываемых и эксплуатируемых АСУ ТП является важнейшей задачей при создании систем, выполняемой на различных стадиях разработки и функционирования АСУ ТП.

Следует особо подчеркнуть важность надежности АСУ ТП на атомных электростанциях, где необходимо практически исключить аварийные ситуации, которые могли бы привести к радиационному поражению персонала и выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду.

- ***Теория надежности***— наука, изучающая закономерности отказов технических систем.

Изучает:

- критерии и показатели надежности технических систем различного назначения;
- методы анализа надежности в процессе проектирования и эксплуатации технических систем;
- методы синтеза технических систем;
- пути обеспечения и повышения надежности технических систем ;

Теория надежности как наука и техническая дисциплина имеет ряд особенностей:

-трудный для изучения предмет - широкое использование математики;

-случайный характер отказов и восстановлений. Эта особенность приводит к тому, что любые решения задач надежности имеют вероятностный характер;

-трудность математического моделирования объектов из-за отсутствия достоверных данных о надежности элементов системы, в частности, данных о законах распределения отказов и восстановлений;

-трудность, а во многих случаях невозможность статистических испытаний из-за технических и экономических ограничений;

-сложность современных систем и, как результат, большие размерности уравнений;

-необходимость применения компьютерных технологий решения практических задач.

МЕСТО, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

*При изучении дисциплины **Надежность и диагностика АСУТП** используется материал дисциплин:*

- Высшая математика,
- Теория вероятностей и математическая статистика,
- Методы оптимизации,
- Моделирование систем,
- Основы программирования.

*Дисциплина **Надежность и диагностика АСУТП** обеспечивает получение следующих знаний*

-умение оценивать надежность аппаратного и программного обеспечения АСУТП и прогнозировать отказы системы;

-умение проводить сравнительный анализ надежности характеристик различных альтернативных вариантов для обоснования выбора наиболее эффективного решения;

-знание методов повышения надежности АСУТП, способах контроля и диагностики.

*В результате изучения дисциплины **Надежность и диагностика АСУ ТП** студенты должны:*

- уметь строить логические модели расчета надежности технического, аппаратного и программного обеспечения АСУ ТП;
- уметь проводить системный сравнительный анализ надежности характеристик различных альтернативных вариантов для обоснования выбора наиболее эффективного решения;
- знать методы повышения надежности АСУ ТП путем введения структурной, временной и информационной избыточности при минимально возможных затратах;
- иметь представление о методах контроля работоспособности АСУ ТП и диагностики ее состояния.

Процессы, протекающие в сложных технических системах, в смысле их надежности, закономерны и не зависят от вида техники.

Разработанные в теории надежности методы анализа, синтеза, способы повышения надежности являются общими для любых технических систем.

Технические системы с позиции надежности — это объект системного анализа.

Надежность технических систем зависит от многих факторов;

критерии и показатели надежности устанавливаются в зависимости от вида технических систем и их применения;

обеспечение надежности в процессе эксплуатации определяется системой обслуживания, квалификацией обслуживающего персонала, экономическими соображениями.

Надежностью называется свойство
технического объекта сохранять свой
характеристики (параметры) в
определенных пределах при данных
условиях эксплуатации.

Надежностью называется свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность системы выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации.

Надежностью называется свойство технического объекта оставаться работоспособным на заданном интервале времени, т.е. выполнять установленные функции при определенных условиях эксплуатации

Надежностью называется свойство технической системы выполнять заданные функции, сохраняя во времени значение устанавливаемых эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортировки.

Надежность включает в себя следующие свойства: *безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность.*

Термины и определения

***Элемент* — объект (материальный, информационный), обладающий рядом свойств, внутреннее строение (содержание) которого значения не имеет, т.е. рассматриваемый в данной задаче как нечто целое, неделимое.**

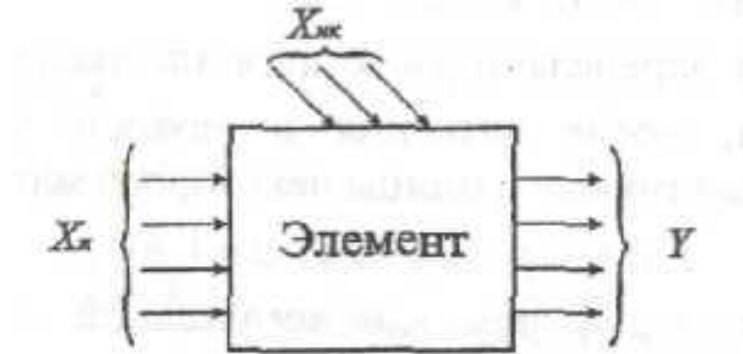
Термины и определения

В теории надежности под элементом понимают элемент, узел, блок, имеющий показатель надежности, самостоятельно учитываемый при расчете показателей надежности системы, т.е. в конкретной задаче внутренняя структура элемента и все взаимосвязи его частей игнорируются.

Примеры технических элементов: реле, датчик, линия связи, регулятор, регистрирующий (показывающий) прибор, исполнительный механизм, микроконтроллер, автоматическая система регулирования.

Термины и определения

Модель элемента



X_k - вектор контролируемых (измеряемых) переменных;

$X_{нк}$ - вектор неконтролируемых (ненаблюдаемых) переменных;

Y - вектор выходных переменных.

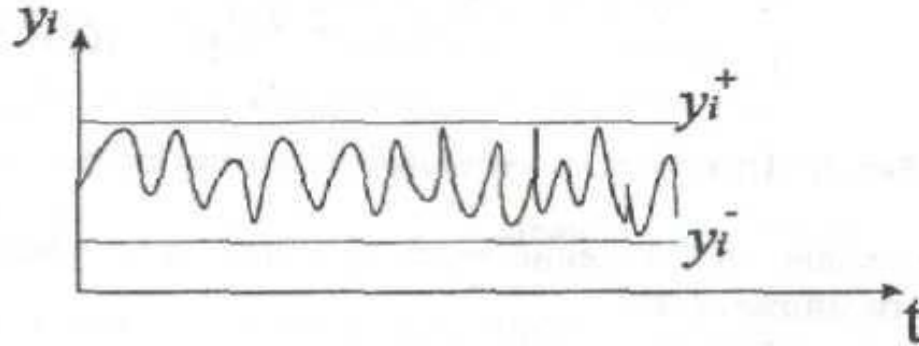
Каждая переменная y_i характеризует то или иное свойство элемента.

Термины и определения

- Реакцией элемента на воздействие X_K и X_{HK} является вектор выходных координат Y , состоящий из n компоненту $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$.
- Каждая переменная y_i характеризует то или иное свойство элемента или его отдельных частей. Выбор числа n и набора переменных y_i ($i = 1, n$) осуществляется на основе проектно-конструкторских и научно-исследовательских разработок, хотя зачастую является субъективным

Термины и определения

Во время эксплуатации элемента имеют место случайные и регулярные изменения X_k и $X_{нк}$, что ведет к вариациям компонент y_i вектора Y во времени t .

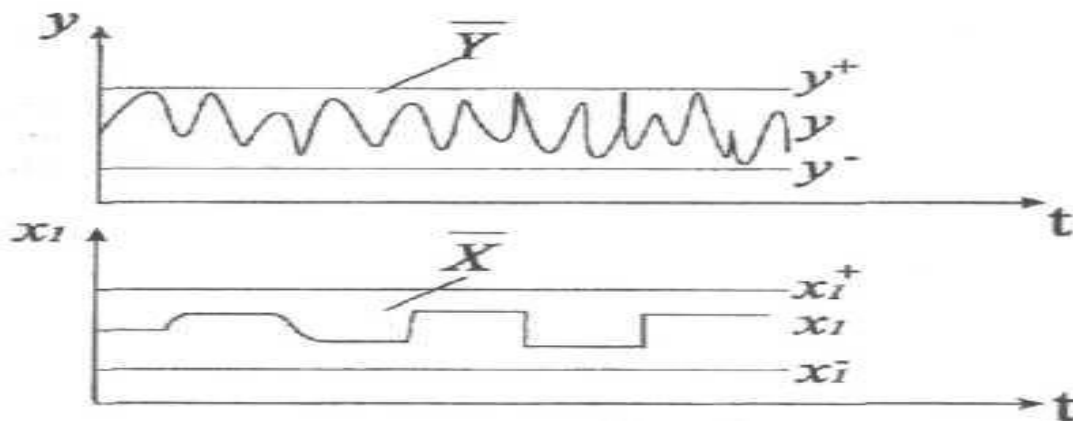


Не все величины X_k и Y измеряются непрерывно, принципиально что они могут быть измерены (этим они отличаются от неконтролируемых составляющих вектора $X_{нк}$).

Одновременно с выбором X при конструировании и изготовлении элемента устанавливают диапазон $[y_i^-, y_i^+]$ допустимых изменений каждой выходной координаты y_i ($i=1, n$). Величины y_i^- , y_i^+ определяют расчетным или экспериментальным путем.

Y - множеством режимов нормальной или допустимой работы элемента.

Термины и определения



При проектировании и изготовлении элемента устанавливают диапазон возможных (допустимых) изменений координат вектора X_k при некотором уровне помех $X_{нк}$.

Одновременно с выбором X при конструировании и изготовлении элемента устанавливают диапазон $[y_i^-, y_i^+]$ допустимых изменений каждой выходной координаты y_i ($i=1, n$). Величины y_i^- , y_i^+ определяют расчетным или экспериментальным путем.

Y - множеством режимов нормальной или допустимой работы элемента.

$$Y = \{y_i^- \leq y_i \leq y_i^+ (i=1, n)\}$$

Термины и определения

- ***Система***— совокупность связанных между собой элементов, обладающий свойством, отличным от свойств отдельных ее элементов.

Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от решаемой задачи.

Практически любой объект с определенной точки зрения может рассматриваться как система.

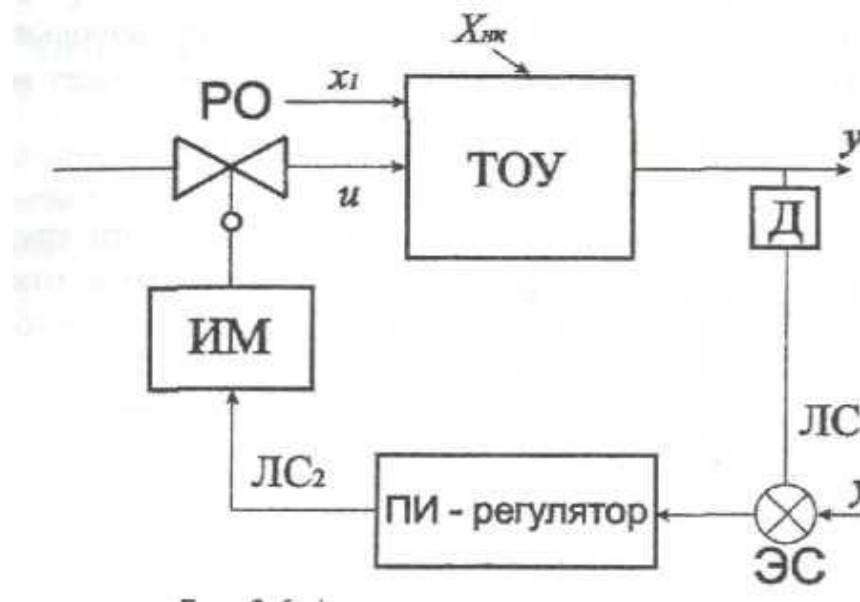
Структура системы — взаимосвязи и взаиморасположение составных частей системы, ее устройство.

Расчленение системы на группы элементов может иметь материальную, функциональную, алгоритмическую и другую основу.

Обычно понятие *структура* связывают с ее графическим отображением.

В зависимости от связей между элементами различают следующие виды структур: последовательные, параллельные, с обратной связью, сетевые и иерархические.

Термины и определения



Автоматическая система регулирования

Д - датчик; ЭС – элемент сравнения; РО – регулирующий орган; ПИ- регулятор, исполнительный механизм ИМ; РО - регулирующий орган; ЛС1 ЛС2 - линии связи; ТОУ - технологический объект управления.

ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Технический объект в процессе функционирования может находиться в различных состояниях.

Исправность — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

Технический элемент считается **исправным**, если при нормальном режиме эксплуатации $X_k \in X$ имеет место допустимая работа элемента $y \in Y$, т.е. выполняются все неравенства:

$$y_i^- \leq y_i \leq y_i^+, i=1, n$$

Работоспособность — состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных НТД.

Технический элемент считается **работоспособным**, если при нормальном режиме эксплуатации $X_k \in X$ имеет место допустимая работа элемента $y \in Y$, т.е. выполняются все неравенства:

$$y_j^- \leq y_j \leq y_j^+, j=1, m$$

Понятие исправности шире, чем понятие работоспособности.

Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению.

Работоспособная система удовлетворяет только тем требованиям, которые существенны для функционирования, и может не удовлетворять прочим требованиям (например, по сохранности внешнего вида элементов). Система, находящаяся в исправном состоянии, заведомо работоспособна.

Если объект неработоспособен, то это свидетельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности системы, т. е. в переходе ее из работоспособного в неработоспособное состояние, называется *отказом*.

Событие, заключающееся в переходе системы из исправного в неисправное, но работоспособное состояние, называется *повреждением*.

Восстановлением называется событие, заключающееся в переходе системы из неработоспособного в работоспособное состояние.

В связи с этим, объекты могут быть:

- *невосстанавливаемые*, для которых работоспособность в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению, т.е. восстановление объекта непосредственно после отказа считается нецелесообразным или невозможным;
- *восстанавливаемые*, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путем замены.

Один и тот же объект в различных условиях применения может быть отнесен к невозстанавливаемым (например, если он расположен в необслуживаемом помещении, куда запрещен доступ персонала во время работы технологического агрегата) и к восстанавливаемым, если персонал сразу же после отказа может начать восстановление.

основных понятий и определений

Само понятие «восстановление» следует понимать не только как корректировку, настройку, пайку или иные ремонтные операции по отношению к тем или иным техническим средствам, но и как замену этих средств.

В принципе подавляющее большинство систем, применяемых для автоматизации технологических процессов, подлежит восстановлению после отказа, после чего они вновь продолжают работу. То же относится к большей части технических средств; к числу невозстанавливаемых можно отнести только такие их элементы, как интегральные схемы, резисторы, конденсаторы и т. п.

Безотказность – свойство технических систем непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Свойство технической системы сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов называется **долговечностью**.

Сохраняемость – это свойство ТС непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и транспортирования.

Сохраняемость характеризуется способностью объекта противостоять отрицательному влиянию условий хранения и транспортирования на его безотказность и долговечность.

Продолжительное хранение и транспортирование объектов могут снизить их надежность при последующей работе по сравнению с объектами, которые не подвергаются хранению и транспортировке.

Ремонтоспособностью называется свойство технической системы, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонта и технического обслуживания.

Техническое состояние ТС в данный момент времени характеризуется исправностью или неисправностью, работоспособностью или неработоспособностью, а также предельным состоянием.

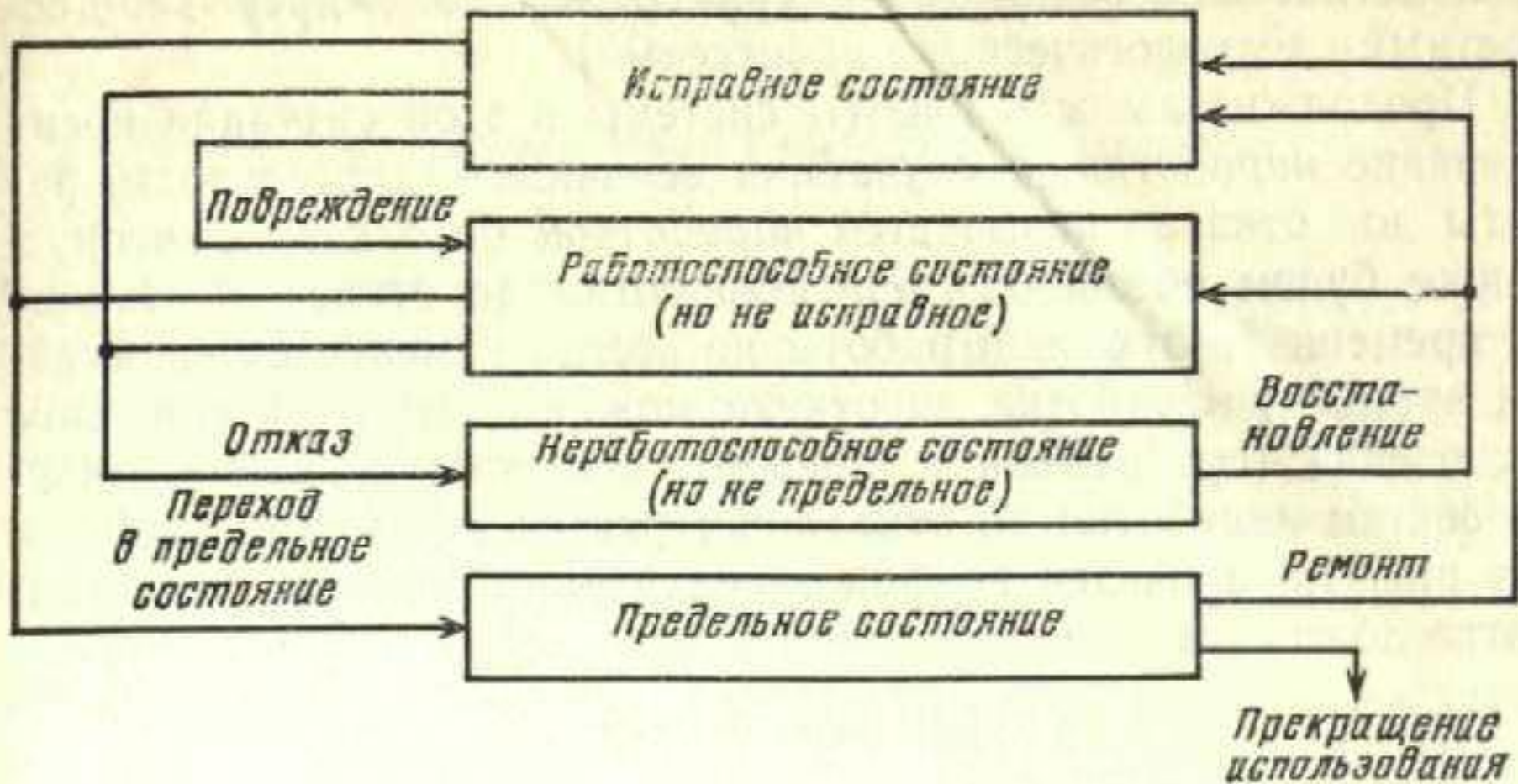
Понятие исправности шире понятия работоспособности. Неисправная ТС может быть работоспособной и неработоспособной – все зависит от того, какому требованию НТД не удовлетворяет данная ТС.

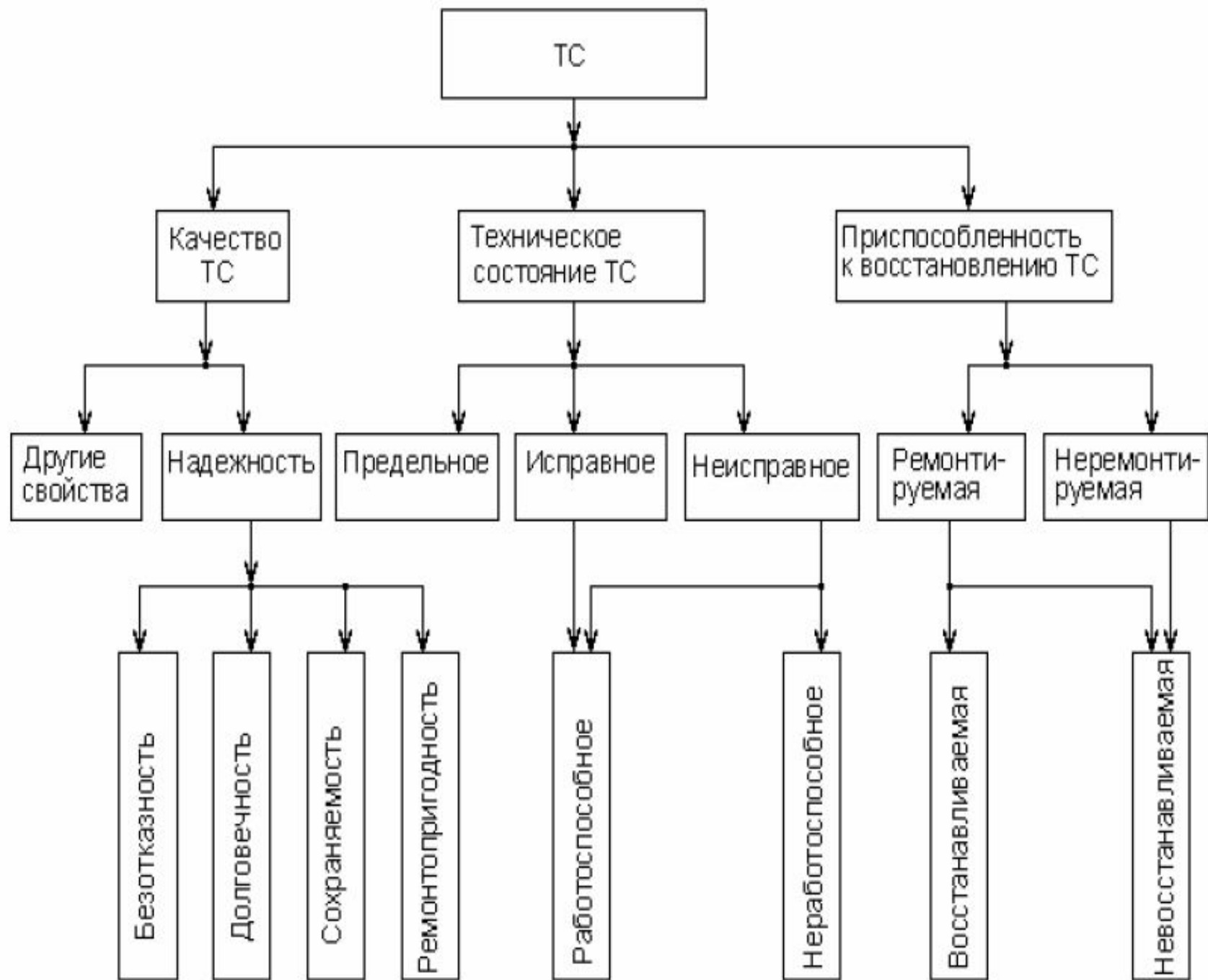
Предельное состояние — состояние объекта, при котором его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.
основных понятий и определений

Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;
- при неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

После попадания в предельное состояние может следовать ремонт (капитальный или средний), в результате чего восстанавливается исправное состояние, или же система окончательно прекращает использоваться по назначению.





Ремонтируемой ТС называется система, неисправность или работоспособность которой в случае возникновения отказа или повреждения подлежат восстановлению. В противном случае, объект называется **неремонтируемым** (простейшим примером неремонтируемого объекта служат электролампочки).

Восстанавливаемая ТС - ТС, работоспособность которой в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации.

Если же в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособности данной ТС при ее отказе по каким либо причинам признается нецелесообразным или неосуществимым, то система называется **невосстанавливаемой**.

Неремонтируемая система или элемент всегда является и невозстанавливаемым.

В то же время, ремонтируемая система может быть как восстанавливаемая, так и невозстанавливаемая — все зависит от существующей системы технического обслуживания и ремонта, конкретной ситуации в момент отказа.

Например, в условии эксплуатации телевизоров, отказавший кинескоп является изделием не восстанавливаемым; но на ремонтном заводе — уже восстанавливаемым.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к выполнению его ремонта и техобслуживания.

На практике бывают ситуации, в которых требуется, чтобы устройство, находясь в режиме ожидания, и, потом, начав работать в произвольный момент времени, проработало бы безотказно в течение требуемого промежутка времени.

Состояние работоспособности устройства в произвольно выбранный момент времени называется **ГОТОВНОСТЬЮ**.

Если при этом работоспособность устройства будет сохраняться в течение заданного интервала времени, то тогда обеспечивается так называемая **оперативная готовность устройства**.

Повреждением называется событие, заключающееся в нарушении исправности ТС или ее составных частей из-за влияния внешних условий, превышающих уровни, установленные НТД.

Отказ – это случайное событие, заключающееся в нарушении работоспособности ТС под влиянием ряда случайных факторов.

Повреждение может быть **существенным** и явиться причиной отказа и **несущественным**, при котором работоспособность ТС сохраняется.

Отказ

Отказом называется событие, после возникновения которого характеристики технического объекта (параметры) выходят за допустимые пределы.

Это понятие субъективно, т. к. допуск на параметры объекта устанавливает пользователь.

- По типу отказы подразделяются на:
 - отказы *функционирования*, при которых прекращается выполнение объектом основных функций;
 - отказы *параметрические*, при которых параметры объекта изменяются в недопустимых пределах.

По своей природе отказы могут быть:

-случайные, обусловленные

непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала, сбоями системы управления и т. п.;

-систематические, обусловленные

закономерными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений:

усталость, износ, старение, коррозия материалов и т. п.

Отказ

По виду отказы подразделяются на:

-зависимые отказы нескольких элементов вызваны одной ошибкой (дефектом);

Например, одновременное погасание осветительных ламп в жилом доме может быть вызвано отказом общего предохранителя на все здание.

-независимые отказы разных элементов вызваны разными причинами (ошибками), при этом вероятность одновременных отказов пренебрежимо мала;

-устойчивые отказы не исчезают сами по себе; после устойчивого отказа элемент заменяется на новый или ремонтируется;

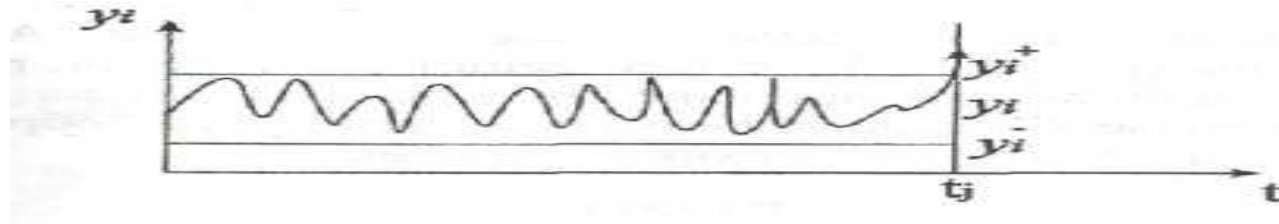
-неустойчивые (перемежающиеся) отказы могут самопроизвольно исчезать, а затем возникнуть снова, ибо причина их не устранена.

Отказ

По *характеру возникновения* отказы могут быть:

- **внезапный** отказ — отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта.

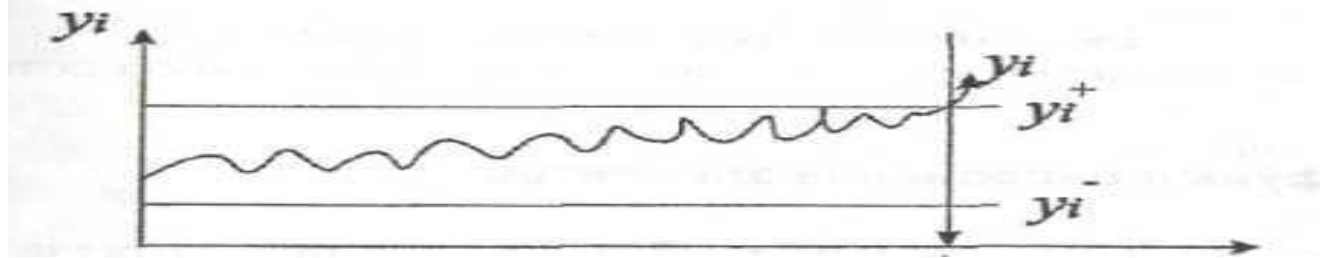
Внезапные отказ обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (пробой изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы, непрогнозируемый.



Отказ

-постепенный отказ — отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения характеристик объекта из-за износа и старения материалов.

Характер изменения координаты $y, (t)$ позволяет прогнозировать момент отказа элемента по тренду $y, \{t\}$



-перемежающиеся отказ - отказ самоустраняющийся (возникающий/исчезающий).

Отказ

По *причине возникновения* отказы могут быть:

- *конструкционный отказ*- отказ появляющийся в результате недостатков и неудачной конструкции объекта;

- *производственный отказ*- отказ связан с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии;

-*эксплуатационный отказ* – отказ, вызванный нарушением правил эксплуатации объекта.

По признаку *дальнейшего использования* объекта отказы могут быть полные или частичные.

-*полный* отказ исключает возможность работы объекта до его устранения.

-*частичный* отказ –отказ при котором объект может частично использоваться.

По признаку *легкости обнаружения* отказы бывают *очевидные* (явные) и *скрытые* (неявные).

По *времени возникновения* отказы подразделяются на *приработочные*, возникающие в начальный период эксплуатации, отказы при *нормальной эксплуатации*, *износосовые* отказы, вызванные необратимыми процессами износа , деталей, старения материалов и т.п.

Существуют *два основных этапа анализа надежности ТС* – **априорный и апостериорный**

Априорный анализ надежности обычно проводится на стадии проектирования ТС.

Этот анализ – предполагает известными количественные характеристики надежности всех используемых элементов системы .

Для элементов (особенно новых), у которых еще нет достаточных количественных характеристик надежности, их задают по аналогии с характеристиками применяющихся аналогичных элементов.

Априорный анализ базируется на априорных (вероятностных) характеристиках надежности, которые приблизительно отражают действительные процессы в аппаратуре ТС.

Этот анализ позволяет на стадии проектирования выявить слабые с точки зрения надежности места в конструкции, принять необходимые меры к их устранению, а так же отвергнуть неудовлетворительные варианты построения ТС.

Априорный анализ (или расчет) надежности имеет существенное значение в практике проектирования ТС.

Апостериорный анализ надежности (на основе опыта) - проводят на основании статистической обработки экспериментальных данных о работоспособности и восстанавливаемости ТС, полученных в процессе их испытаний и эксплуатации.

Целью таких испытаний является получение оценок показателей надежности ТС и ее элементов.

Оценки получают методами математической статистики по результатам наблюдений (ограниченного объема).

При этом чаще всего предполагают, что результаты наблюдений являются случайными величинами, которые подчиняются определенному закону распределения с неизвестными параметрами.

Под анализом надежности ТС будем понимать

- определение (вычисление) конкретных значений показателей надежности (априорный анализ),
- статистических оценок показателей надежности (апостериорный анализ).

Показателями надежности называются количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надежность элемента (системы).

Различают *два основных вида показателей надежности (ПН)*.

Единичный показатель надежности – это количественная характеристика одного из рассмотренных ранее свойств надежности.

Комплексный показатель надежности – это количественная характеристика, определяющая два или более свойств надежности одновременно.

Выбор *показателя надежности*

зависит от назначения ТС и характера ее функционирования.

Показатели надежности должны:

- достаточно полно описывать надежность свойства системы,
- быть удобными для аналитического расчета,
- быть удобными для экспериментальной проверки по результатам испытаний,
- должны иметь разумный физический смысл,
- допускать возможность перехода к показателям эффективности.

Количественная оценка надежности элементов ТС и ТС в целом проводится обычно при помощи единичных показателей надежности - безотказности, восстанавливаемости и долговечности, а также комплексных ПН, определяющих свойства безотказности и восстанавливаемости.

Отказ элемента (системы) можно считать случайным событием, происходящим под влиянием многих случайных факторов.

Количественные показатели случайных событий строятся на основе теории вероятности.

Необходимо иметь достаточно большая совокупность исследуемых событий.

На практике количественные характеристики надежности элементов определяют статистическим путем на основе испытания достаточно большой партии однотипных элементов (систем).

Теория вероятностей и математическая статистика являются основным аппаратом, который используется при исследовании надежности ТС, а сами характеристики надежности выбираются из числа показателей, принятых в теории вероятностей.

Рассмотрим элемент, начинающий функционировать в момент времени $t=0$, в этот момент элемент находится в работоспособном состоянии.

Предположим, что элемент выходит из работоспособного состояния только вследствие отказа.

Обозначим через T время, прошедшее от момента начала функционирования.



$$T = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4)$$

Наработка - продолжительность работы элемента.

Наработка до отказа— длительность работы до отказа (случайная величина) .

Последовательность отказов элементов, происходящих в случайные моменты времени t_i называется потоком отказов.

Поток отказов называется **стационарным**, если вероятностные характеристики не зависят от времени. Закон распределения числа отказов на произвольном отрезке времени не зависит от его расположения на оси времени, а зависит только от длины отрезка.

Поток отказов называется **потокком без последствия**, если для любого набора непересекающихся интервалов времени числа отказов на этих интервалах есть взаимно независимые случайные величины.

Отсутствие последействия означает, что распределение числа отказов на любом интервале не зависит от того, что имело место на предшествующих и последующих интервалах до и после этого промежутка времени.

Поток отказов называется **ординарным**, если вероятность одновременного возникновения двух или более отказов равна нулю.

Поток отказов, обладающий свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последействия, называется **простейшим**.

основных понятий и определений

Величина t_j зависит от случайных отклонений технологических условий изготовления элементов от номинальных, различия условий транспортировки, монтажа, наладки и не будет одинаковой у различных элементах даже при абсолютно одинаковых условиях эксплуатации. К тому же сами условия эксплуатации (температура, вибрация, качество технического обслуживания, частота включения и т. д.) в определенной степени отличны друг от друга, поэтому величина t_j случайная.

Наработка до отказа в отличие от времени безотказной работы не всегда измеряется единицами времени; наработка до отказа может измеряться и числом включений (срабатываний, циклов).

Однако для большей части систем наработка до отказа измеряется единицами времени.

Наработка — продолжительность или объем работы ТС, измеряемые единицами времени, числом циклов нагружения, километрами пробега и т. п.

Наработка между отказами — наработка ТС от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

Технический ресурс — наработка ТС от начала его эксплуатации (или ее возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние. Технический ресурс может быть также регламентирован, например, от начала эксплуатации до среднего или капитального ремонта, или от среднего до капитального ремонта, после которого требуется продление технического ресурса.

Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов.

Для невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

Назначенный ресурс — суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации (в том числе хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния.

Для большинства объектов электромеханики в качестве критерия долговечности чаще всего используется технический ресурс.

Время восстановления работоспособного состояния — продолжительность восстановления работоспособного состояния ТС.

Надежность комплексное свойство ТС, включающее компоненты: - безотказность; - ремонтпригодность; - долговечность; - сохраняемость.

ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Безотказность — это способность объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени.

Ремонтопригодность — способность объекта, заключающаяся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Долговечность — способность объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость - свойство технического объекта сохранять свои характеристики (параметры) в процессе хранения.

Классификация технических систем

- Технические системы могут быть невосстанавливаемыми и восстанавливаемыми, длительного и короткого времени работы, резервированными и нерезервированными.
- Техническая система называется **невосстанавливаемой** (неремонтируемой), если ее отказ приводит к неустранимым последствиям и систему нельзя использовать по своему назначению. Работа после отказа невосстанавливаемой системы считается невозможной или нецелесообразной.

-

- Под **восстанавливаемой** (ремонтируемой) понимается система, которая может продолжать выполнение своих функций после устранения отказа, вызвавшего прекращение ее функционирования. Работа восстанавливаемой системы после отказа может быть возобновлена в результате проведения необходимых восстановительных работ. При этом под восстановлением системы понимается не только ремонт тех или иных элементов системы, а также полная замена отказавших элементов на новые.
- Существуют системы **смешанного** типа, у которых часть элементов может восстанавливаться, а другая — нет.

Классификация технических систем

- **Резервированием** называют способ повышения надежности путем включения резервных единиц, способных в случае отказа основного устройства выполнять его функции.
- Три метода резервирования: общей, отдельный (поэлементный) и комбинированный (смешанный).
 - общим** называется такое резервирование системы, при котором параллельно включаются идентичные системы;
 - отдельным** называется резервирование системы путем использования отдельных резервных устройств;
 - при **комбинированном** резервировании в одной и той же системе применяется общее и отдельное резервирование.

Отношение числа резервных устройств к числу основных называется кратностью резервирования.

Если это отношение — число целое, то такое резервирование называется резервированием с целой кратностью, иначе — с дробной кратностью.

Классификация технических систем

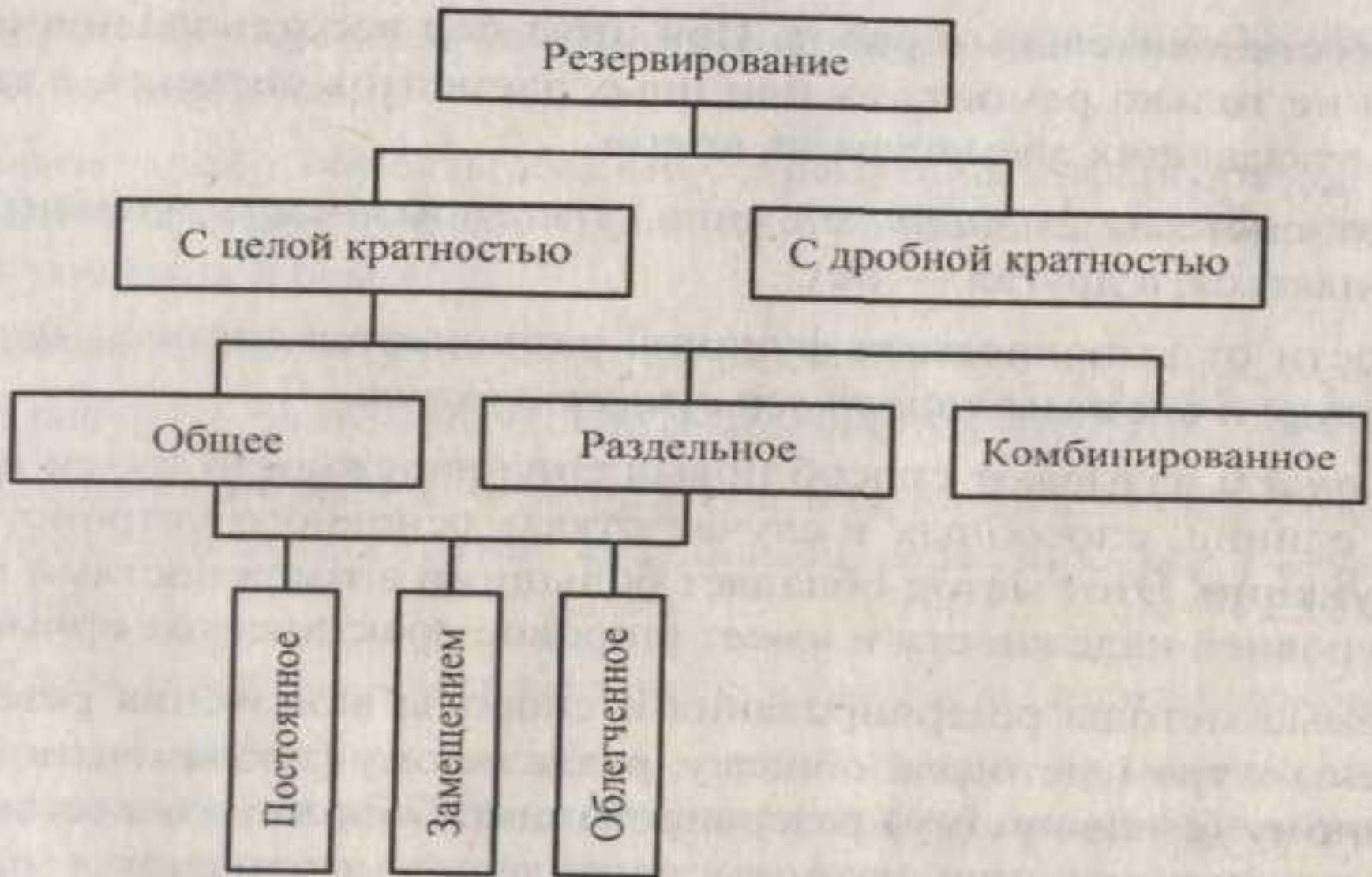


Рис. 1.1. Классификация методов резервирования

Классификация технических систем

Главными способами включения резервных устройств при отказах основных являются следующие:

- **постоянное**, при котором резервные объекты соединены с основными в течение всего времени работы;
- **замещением**, при котором резервные объекты замещают основные только после отказа последних.

При этом в обоих случаях резервные объекты могут находиться в трех режимах работы:

- **нагруженном**, при котором резервные объекты находятся в тех же условиях, что и основные;
- **ненагруженном**, при котором резервные объекты не включены и не могут отказывать;
- **облегченном**, при котором резервные объекты включены, но работают не на полную нагрузку, т. е. их надежность в резервном состоянии выше, чем в рабочем. Однако отказ элементов возможен.

КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ

Критерием называется признак по которому оценивается надежность.

Показателем надежности называется численное значение критерия.

Надежность является сложным физическим свойством, поэтому не существует одного обобщающего критерия и показателя.

Только семейство критериев позволяет оценить надежность сложных технических систем.

Показателями надежности называются количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надежность элемента (системы).

Различают *два основных вида показателей надежности (ПН)*.

Единичный показатель надежности – это количественная характеристика одного из рассмотренных ранее свойств надежности.

Комплексный показатель надежности – это количественная характеристика, определяющая два или более свойств надежности одновременно.

Критерии надежности невосстанавливаемых элементов

Невосстанавливаемые элементы работают до первого отказа.

Длительность безотказной работы J -го элемента есть наработка t_j до первого отказа.

В эксперименте над N одинаковыми элементами к моменту времени t ,

$0 < t \leq t_m$, получены:

$N(t)$ – число исправных элементов;

$N - N(t)$ – число отказавших элементов;

ΔN – число отказов на малых отрезках времени Δt , расположенных на $[0, t_m]$;

t_m – длительность эксперимента, завершающегося при отказе всех N элементов

Функция ненадежности элемента

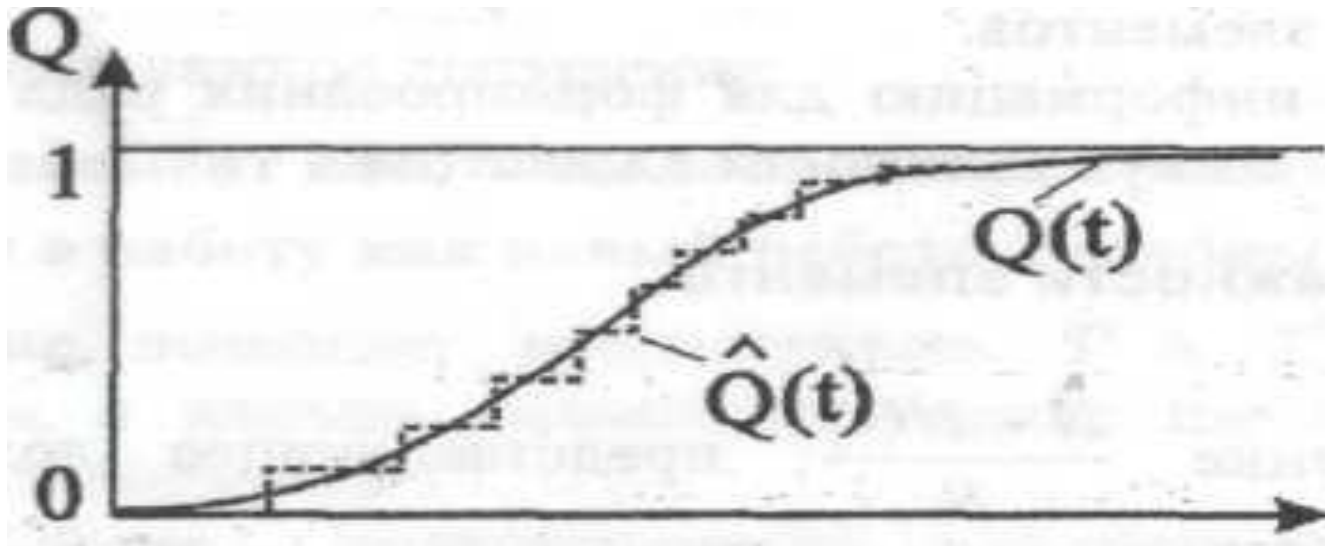
^

$Q(t) = [N - N(t)] / N = 1 - N(t)/N$ – статистическая функция распределения отказов.

Доля или частота отказавших к моменту t элементов от общего их числа N

$Q(t) = Q(T < t)$ - функция ненадежности
элемента - интегральный закон
распределения вероятностей отказов элемента
до некоторого момента времени t .

Вероятность того, что элемент откажет в
течение времени t или что время его работы
до отказа меньше времени его
функционирования T



Функция ненадежности - в общем случае
неубывающая непрерывная функция времени t ,
 $0 \leq t \leq \infty$.

^

Статистическая функция ненадежности $Q(t)$
является кусочно-постоянной неубывающей
функцией времени.

В реальных условиях функция $Q(t)$ нам не
известна и мы всегда работаем с ее

^

оценкой $Q(t)$.

$$Q(\infty)=1$$

$$0 \leq Q(t) \leq 1$$

$$Q(0)=0$$

Функция надежности элемента

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что элемент не откажет в течение времени t или что время его работы до отказа больше времени его функционирования T

$$P(t) = P(T > t)$$

Вероятность безотказной работы является убывающей функцией времени, имеющей следующие свойства:

$$0 \leq P(t) \leq 1, \quad P(0) = 1, \quad P(+\infty) = 0.$$

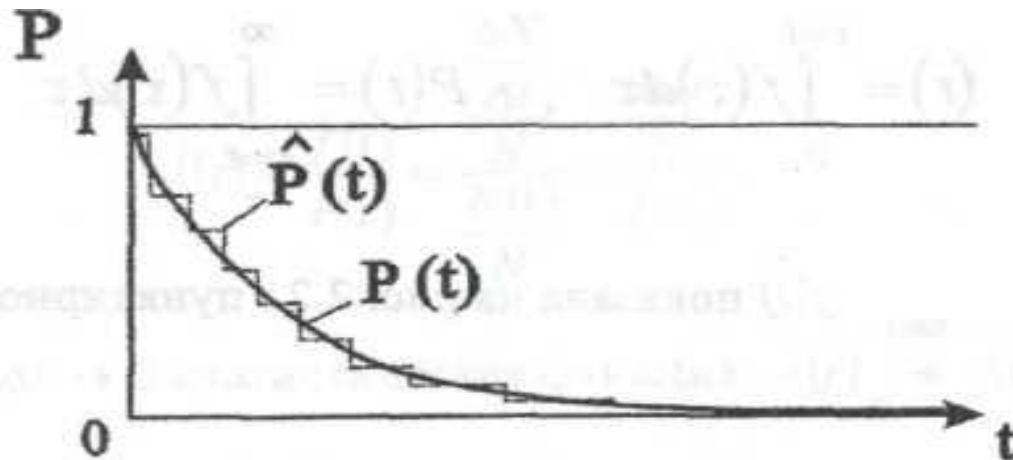
По статистическим данным об отказах, полученным из опыта или эксплуатации, $P(t)$ определяется следующей статистической оценкой:

$$\hat{P}(t) = N(t) / N$$

N - общее число элементов находящихся на испытании;

$N(t)$ – число исправных элементов

Критерии надежности невосстанавливаемых элементов



Вероятность безотказной работы имеет следующие достоинства:

- характеризует надежность во времени, являясь интервальной оценкой;
- определяет многие важные показатели техники, например эффективность, безопасность, живучесть, риск;
- сравнительно просто вычисляется и определяется по статистическим данным об отказах техники;
- достаточно полно характеризует надежность невосстанавливаемой техники.

Основной недостаток этого критерия — ограниченность применения.

Вероятность безотказной работы характеризует надежность невосстанавливаемого элемента или восстанавливаемого до первого его отказа.

Плотность вероятности отказа

При решении многих задач надежности оказывается удобным применять не интегральные распределения $P(t)$, $Q(t)$, а дифференциальный закон распределения вероятности отказа

$$f(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(1 - P(t))}{dt} = -\frac{dP}{dt}.$$

Эту зависимость часто называют плотностью вероятностей отказа.

$$Q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad P(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau$$

Функция $f(t)$ определена на отрезке времени $[0, \infty]$ и всегда положительна.

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1.$$

Статистическая плотность распределения находится по экспериментальным данным.

Частотой отказов по статистическим данным называется отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих (испытываемых) при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются

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

где t – середина малого интервала времени Δt , на котором имело место ΔN отказов элементов;

ΔN – число отказов на интервала времени Δt

Интенсивность отказов

Функция интенсивности отказов

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

представляет условную плотность вероятности отказа элемента в момент t при условии, что до этого времени элемент не отказал.

Функцию интенсивности отказов $\lambda(t)$ обычно называют **лямбда-характеристикой**.

Статистическая лямбда-характеристика определяется по результатам испытаний N одинаковых элементов на надежность.

Интенсивностью отказов по статистическим данным называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\hat{f}(t)}{\hat{P}(t)} = \frac{\frac{\Delta N}{\Delta t}}{\frac{N}{N(t)}} = \frac{\Delta N}{N(t) \Delta t}$$

$$\lambda = \Delta N \setminus N_{\text{cp}} \Delta t$$

где ΔN – число отказов на интервала времени Δt ;

$N(t)$ – число исправных элементов;

$N_{\text{cp}} = (N_i + N_{i+1})/2$ – среднее число исправно работающих элементов в интервале Δt

Интенсивность отказов

Интенсивность отказов является основным показателем надежности элементов сложных систем. Это объясняется следующими обстоятельствами:

- надежность многих элементов можно оценить одним числом, т. к. интенсивность отказа элементов — величина постоянная;
 - по известной интенсивности наиболее просто оценить остальные показатели надежности как элементов, так и сложных систем;
 - обладает хорошей наглядностью;
 - интенсивность отказов нетрудно получить экспериментально.
- Опыт эксплуатации сложных систем показывает, что изменение интенсивности отказов большого количества объектов описывается U-образной кривой



Интенсивность отказов

- Период приработки объекта имеет повышенную интенсивность отказов, вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами производства, монтажа и наладки. Иногда с окончанием этого периода связывают гарантийное обслуживание объекта, когда устранение отказов производится изготовителем.
- В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов практически остается постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего из-за случайных изменений нагрузки, несоблюдения условий эксплуатации, неблагоприятных внешних факторов и т. п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта.
- Возрастание интенсивности отказов относится к периоду старения объекта и вызвано увеличением числа отказов из-за износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией.

Интенсивность отказов

Из формул для вычисления оценок $\hat{\lambda}$ и \hat{f} следует, что для всех t , $t \neq 0$. При $t=0$ функции $\lambda(0)=f(0)$, так как $N(0)=N$.

$$\hat{\lambda}(t) > \hat{f}(t)$$

Рассмотренная особенность верна и для неслучайных функций $\lambda(t)$ и $f(t)$:

$\lambda(t) > f(t)$ при $0 \leq t \leq \infty$ и $\lambda(0) = f(0)$.

Знание функции интенсивности позволяет находить любые другие характеристики надежности.

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$$

$$f(t) = -\frac{dP}{dt} = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$$

Критерии надежности невосстанавливаемых элементов

Известная функция	Другие функциональные показатели надежности		
$Q(t)$	$P(t) = 1 - Q(t)$	$f(t) = \frac{dQ}{dt}$	$\lambda(t) = \frac{dQ/dt}{1 - Q(t)}$
$P(t)$	$Q(t) = 1 - P(t)$	$f(t) = -\frac{dP}{dt}$	$\lambda(t) = \frac{-dP/dt}{P(t)}$
$f(t)$	$Q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$	$P(t) = \int_t^\infty f(\tau) d\tau$	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_t^\infty f(\tau) d\tau}$
$\lambda(t)$	$Q(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$	$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$	$f(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$

Функциональные показатели надежности $Q(t)$, $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ наиболее полно описывают поведение случайной величины T - наработки до отказа элемента. Однако получение этих характеристик или хотя бы статистических аналогов вызывает значительные трудности, обусловленные длительными экспериментами с большим числом элементов, сложной математической обработкой данных и проверкой гипотез согласия.

Поэтому при решении прикладных задач надежности шире используют числовые показатели надежности, оценки которых получают экспериментальным данным более просто, чем оценки функциональные показателей.

Численные показатели надежности: средняя наработка до отказа, дисперсия наработки до отказа, гамма-процентный ресурс надежности.

Средняя наработка до отказа

Средним временем безотказной работы называется математическое ожидание времени безотказной работы элемента: $t_H = M \{T_1\}$

t_H - средняя наработка до отказа,

M - символ операции "математическое ожидание".

Оценка средней наработки до отказа определяется по известным из эксперимента значениям наработки до отказа $t_j, j = \overline{1, N}$:

$$\hat{t}_H = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j$$

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt$$

Для определения средней наработки до первого отказа необходимо знать моменты выхода из строя всех испытуемых элементов.

Для вычисления средней наработки на отказ пользоваться указанной формулой неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя элементов n_i в каждом i -м интервале времени, среднюю наработку до первого отказа лучше определять из уравнения

$$\bar{T}_{\text{ср}} \approx \left(\sum_{i=1}^m n_i t_{\text{ср}i} \right) / N_0$$

где $t_{\text{ср}i} = (t_{i-1} + t_i)/2$, $m = t_k / \Delta t$,

t_{i-1} - время начала i -го интервала; t_i - время конца i -го интервала; t_k - время, в течение которого вышли из строя все элементы; $\Delta t = t_{i-1} - t_i$ - интервал времени.

• Дисперсия наработки до отказа

Величина σ^2 характеризует разброс значений наработок до отказа относительно средней наработки t_H :

$$\delta^2 = M\{(t - t_H)^2\} = \int_0^{\infty} (t - t_H)^2 f(t) dt$$

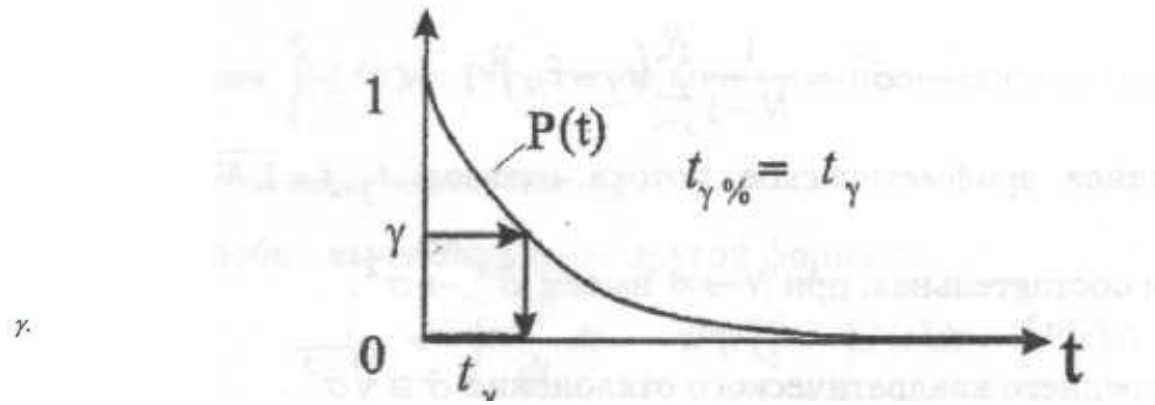
Оценка дисперсии определяется по экспериментальным наработкам до отказа t_j , $j=1, N$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (t_j - \hat{t}_H)^2$$

t_H - среднее арифметическое потока отказов

Гамма-процентный ресурс надежности

t_γ – γ –процентный ресурс – наработка, в течение которой элемент не достигает состояния отказа с вероятностью $\gamma/100$



Гамма-ресурс t_γ зависит от двух факторов - надежности элемента, в частности функции $P(t)$, и гарантийного уровня γ

Например, при $\gamma=0,9$ получен гамма-ресурс $t_\gamma = 1000$ часов. При этом из 1000 включенных элементов к моменту 1000 часов не откажут 900 элементов. Если понизить уровень γ до 0,3, то гамма-ресурс t_γ возрастет до 4000 часов, но при этом из 1000 элементов только 300 доработают до рубежа 4000 часов

ПРИМЕР. На испытании находилось $N=100$ элементов. Данные об их отказах приведены в первых трех строках таблицы.

Интервал, час	0—100	100— 200	200— 300	300— 400	400— 500	500— 600	600— 700	700— 800
Длина Δt , час	100	100	100	100	100	100	100	100
Число отказавших образцов $n(t, t + \Delta t)$	1	2	1	3	2	2	1	3

Необходимо вычислить показатели надежности: $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, T_1 .

Решение. Вычислим $P(t)$. Будем иметь в виду, что нам достоверно неизвестен момент отказа на промежутке длины Δt . Предположим, что отказы происходят в середине этого промежутка, т.е. $t=50, 150, 250$ и т.д. На первом интервале -1 отказ. Вероятность безотказной работы:

$$P(50) = \frac{N_0 - n(100)}{N_0} = \frac{100 - 1}{100} = 0,99.$$

На втором участке произошло 2 отказа, а всего за два периода длины — 3 отказа.

$$P(150) = \frac{N_0 - n(200)}{N_0} = \frac{100 - 3}{100} = 0,97.$$

Вычисления значений $f(t)$

$$f(50) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N_0 \Delta t} = \frac{1}{100 \cdot 100} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1},$$

$$f(150) = \frac{2}{100 \cdot 100} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}$$

В данном случае число отказов на промежутке длины Δt не суммируется с числом отказов на предыдущих участках, т.к. функция $f(t)$ является точечной.

Вычислим значения $\lambda(t)$.

На первом участке произошел 1 отказ, при этом в начале участка число исправных элементов $N(0)=N=100$, а в конце участка $N(100)=N-1=99$

$$\lambda(50) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t} = \frac{1}{\frac{100 + 99}{2} \cdot 100} = 1,01 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}.$$

На втором участке

$$\lambda(150) = \frac{2}{\frac{99 + 97}{2} \cdot 100} = 2,03 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}$$

Вычислим среднее время безотказной работы

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1 \cdot 50 + 2 \cdot 150 + 1 \cdot 250 + 3 \cdot 350 + 2 \cdot 450 + 2 \cdot 550 + 1 \cdot 650 + 3 \cdot 750}{15} = 437 \text{ час.}$$

$P(t)$	0,99	0,97	0,96	0,93	0,91	0,89	0,88	0,85
$f(t) \cdot 10^{-4}, \text{ час}^{-1}$	1	2	1	3	2	2	1	3
$\lambda(t) \cdot 10^{-4}, \text{ час}^{-1}$	1,01	2,03	1,04	3,17	2,20	2,22	1,12	3,47

В эксперименте над N одинаковыми элементами к моменту времени t ,

$0 < t \leq t_m$, получены:

$N(t)$ – число исправных элементов;

$N - N(t)$ – число отказавших элементов;

ΔN – число отказов на малых отрезках времени Δt , расположенных на $[0, t_m]$;

t_m – длительность эксперимента, завершающегося при отказе всех N элементов

$Q(t) = [N - N(t)] / N = 1 - N(t)/N$ – статистическая функция распределения отказов.

$P(t) = N(t) / N$ – статистическая функция надежности

$f(t) = \Delta N / N \Delta t$ – статистическая плотность распределения

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\hat{f}(t)}{\hat{P}(t)} = \frac{\frac{\frac{\Delta N}{\Delta t}}{N}}{\frac{N(t)}{N}} = \frac{\Delta N}{N(t) \Delta t} \quad - \text{ статистическая лямбда-характеристика}$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$\lambda \equiv \lambda$$

$$t_H = 1/\lambda \quad \delta^2 = 1/\lambda^2$$

Задача №2

Из 1000 одновременно включенных однотипных элементов к моменту времени 500 отказало 500 элементов.

- Найти оценки интенсивности отказа и средней наработки до отказа элемента.

Основные законы распределения наработки до отказа

Поведение случайной величины - наработки до отказа T - может быть описано тем или иным теоретическим законом распределения вероятностей $Q(t)$ или $P(t)$.

Установлено, что поведение наработки до отказа T технических средств автоматизации удовлетворительно описывается следующими законами распределения:

- экспоненциальным;
- Вейбулла;
- нормальным;
- усеченным нормальным;
- суперпозицией указанных законов

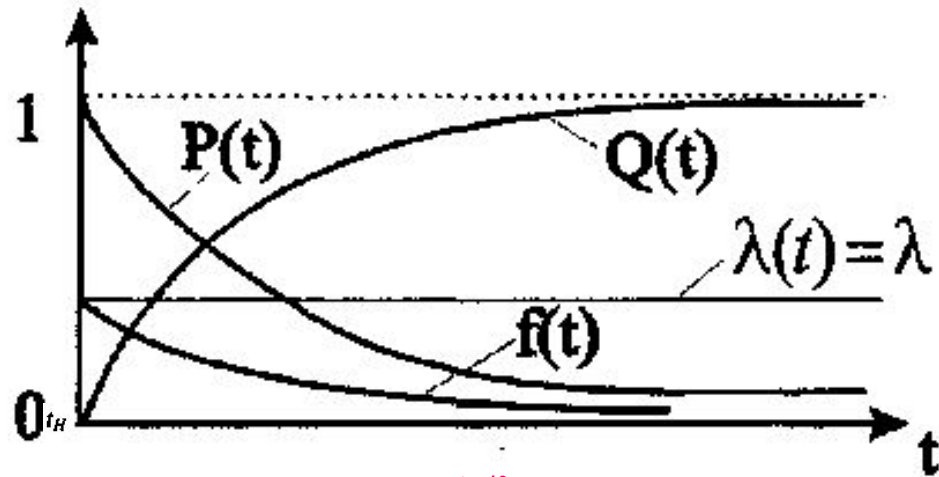
- Экспоненциальное (показательное) распределение относится к однопараметровым законам распределения вероятностей.

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$\lambda \equiv \lambda$$



Средняя наработка до отказа равна $t_H = 1/\lambda$

Дисперсия равна $\delta^2 = 1/\lambda^2$

Величина γ -процентного ресурса определяется по формуле

$$t_\gamma = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100}.$$

Экспоненциальное распределение выделяется среди других распределений свойством *"отсутствия памяти"*.

Пусть X — время службы некоторого изделия с экспоненциальным законом распределения. "Отсутствие памяти" означает, что изделие, проработавшее время t , имеет такое же распределение, что и новое, только что начавшее работу.

Математически это свойство выражается в виде следующего равенства:

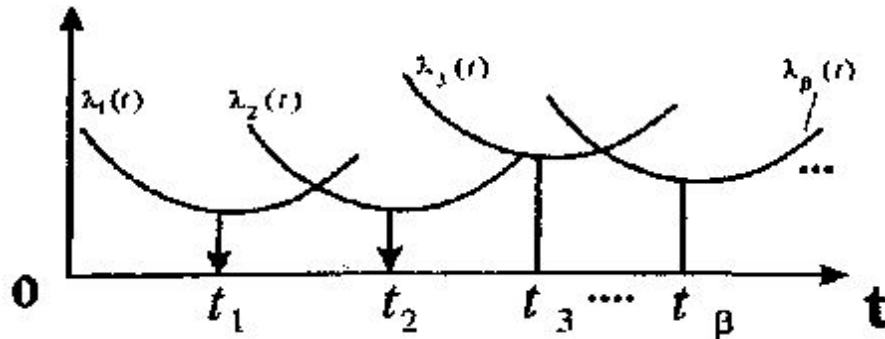
$$P(X > t+x | X > t) = P(X > x)$$

для любых $t, x \geq 0$.

Данное свойство как бы исключает износ и старение изделия.

Экспоненциальное распределение

- Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать время безотказной работы большого числа элементов. Экспоненциальный закон распределения хорошо описывает наработки до внезапного отказа сложных элементов, которые состоят из большого числа M разнородных деталей (частей) с интенсивностями $\lambda_{\beta}(t)$, $\beta=1,2,\dots,M$, имеющими экстремумы в разные моменты времени t_{β} , $\beta=1,2,\dots,M$.



Примерами таких элементов могут служить электронные устройства, средства вычислительной техники, пневмоавтоматики и другие ТСА.

Экспоненциальное распределение удовлетворительно описывает надежность ТСА, обладающих малым периодом приработки элементов и почти не достигающих периода старения (износа) из-за относительно быстрого морального износа и замены на более совершенные.

Экспоненциальное распределение

Во многих прикладных задачах требуется знание вероятности безотказной работы элемента $P(t_1, t_2)$ на интервале времени (t_1, t_2) при условии, что элемент был исправен до момента t_1 ,

$$P(t_1, t_2) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)}$$

Для экспоненциального распределения $P(t) = e^{-\lambda t}$ легко получить условную вероятность безотказной работы на отрезке (t_1, t_2)

$$P(t_1, t_2) = \frac{e^{-\lambda t_2}}{e^{-\lambda t_1}} = e^{-\lambda(t_2 - t_1)}$$

Эта вероятность $P(t_1, t_2)$ не зависит от положения отрезка (t_1, t_2) на оси времени, а зависит только от его длины $\Delta t = t_2 - t_1$.

Это свойство характерно только для экспоненциального закона

Экспоненциальное распределение широко применяется в практических расчетах по надежности, в частности при проектной оценке надежности элементов и систем. При расчетах надежности систем, состоящих из большого числа элементов с неизвестными или "сомнительными" характеристиками надежности, всегда следует использовать экспоненциальное распределение, позволяющее наиболее просто получать расчетные показатели безотказности.

Распределение Вейбулла

Функциональные показатели надежности случайной величины подчиняются **двухпараметровому** распределению Вейбулла вида

$$Q(t) = 1 - e^{-k t^m},$$

$$P(t) = e^{-k t^m},$$

$$f(t) = m k t^{m-1} e^{-k t^m},$$

$$\lambda(t) = k m t^{m-1},$$

k, m - числовые параметры, определяемые по результатам испытаний элементов на надежность $t_j, j=1, N$.

Параметр k определяет масштаб распределения, при вариациях k кривая распределения «сжимается» или «растягивается» по переменной t .

Параметр m характеризует вид распределения,