



**НАДЕЖНОСТЬ  
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**



**2011**



**САМАРА**

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**НАДЕЖНОСТЬ  
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

САМАРА

2011



УДК

ББК

Виноградов А.С.

**НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК:** Учеб. пособие / Сост. А.С. Виноградов  
- Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. - 73 с.; ил.

В учебном пособии включены лекции по надежности авиационных двигателей и энергетических установок.

Учебное пособие предназначено для студентов факультета двигателей летательных аппаратов, обучающихся по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки", при изучении курса «Надежность АД и ЭУ». Подготовлено на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

УДК

ББК

© Виноградов А.С., 2011

© Самарский государственный

аэрокосмический университет, 2011



*Рекомендуемая к прочтению литература*

1. Акимов В. М. Основы надежности газотурбинных двигателей. Учебник для студентов машиностроительных специальностей ВУЗов – М: Машиностроение, 1981 – 207с.
2. Белоусов А. И., Биргер И. А. Прогностная надежность двигателей турбомашин: Учебное пособие – Куйбышев, КуАИ, 1983 – 75с.
3. Белоусов А. И., Фролов В. А. Методы повышения вибрационной прочности лопаток турбомашин: Учебное пособие – Куйбышев, КуАИ, 1983 – 71с.
4. Кесаев Х. В., Трофимов Р. С. Надежность двигателей летательных аппаратов: Учебник для студентов ВУЗов – М.: Машиностроение, 1982 – 136с.
5. Костин В. И. Основы надежности газотурбинных двигателей и управление качеством продукции: Учебное пособие – Куйбышев, КуАИ, 1980 – 80с.
6. Костогнин В. В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок: Учебник для студентов авиационных ВУЗов – М.: Машиностроение, 1976 – 248с (1-е издание) 1988 – 272с (2-е издание).
7. Кузнецов Н. Д., Цейтнин В. И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей – М.: Машиностроение, 1975 – 216с.
8. Пигунин Д. Ф. Надежность двигателей летательных аппаратов: Конспект лекций – Куйбышев, КуАИ, 1976 – 60с.

## 1. Основные понятия и характеристики надежности

### 1.1. Основные понятия надежности

**Надежность** – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значение всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

**Примечание:** свойством, которое в зависимости от условий его применения состоит из сочетаний свойств: безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.



Рис. 1

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки.

**Долговечность** – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

**Ремонтопригодность** – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

**Сохраняемость** – свойство объекта сохранять значения показателей безопасности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

**Установленные параметры** – параметры которые однозначно определяют возможность использования изделия по назначению. Эти параметры содержатся в ТЗ, но проектирование двигателя.

Для РД:

$P_0$  – тяга земная;  
 $P_n$  – тяга пустотная;  
 $t_p$  – время работы;  
 $I_y$  – удельный импульс;  
 $m_{дв}$  – масса двигателя;  
 $m_{нб}$  – массовый расход наддува баков;  
 $T_{над}$  – температура наддува  
 $P_{над}$  – давление наддува.

Для ВРД:

$P_0$  – взлетная тяга;  
 $P$  – крейсерская тяга;  
 $C_{уд}$  – удельный расход воздуха;  
 $m_{дв}$  – масса двигателя;  
 $T_g^*$  - температура газа перед турбиной;  
 $\Pi_\Sigma$  - суммарная степень сжатия;  
 $G_B$  – расход воздуха.

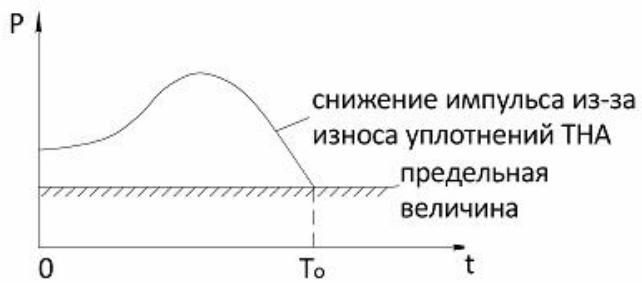


Рис. 2.

$T_o$  – время отказа.

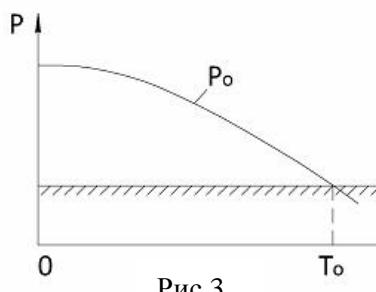


Рис.3

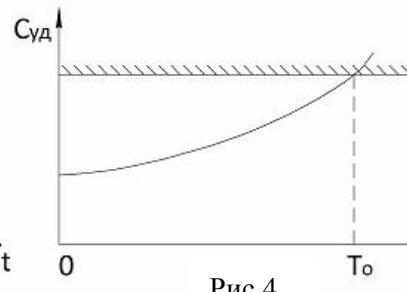


Рис.4

На основании ТЗ для двигателя разрабатывается ТЗ для агрегатов.

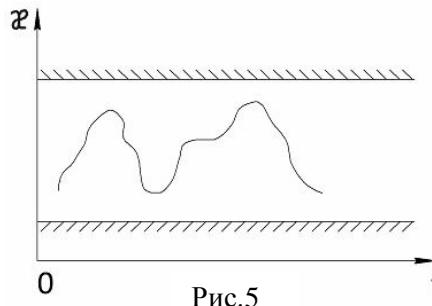


Рис.5

$$\chi = \frac{\dot{m}_{\text{ОКИСЛИТЕЛЬ}}}{\dot{m}_{\text{ГОРИЮЧЕЕ}}}$$

Если двигатель одноразового применения (неремонтопригодный), то свойства ремонтопригодности нет. Если двигатель одноразового включения, то свойства безопасности и долговечности совпадают.

Исходя из определений, надежность можно разделить на два вида. Это особенно важно для условий доводки.

Рассмотрим графики, приведенные на рисунке 3, для нескольких двигателей. Будет иметь место разброс параметров. Для разных двигателей отказы будут происходить в разное время.



Рис.6

$$P(t) = \text{Вер}\{\Pi \in \Pi_{TPEB}(t_1, t_2)\} \quad (1)$$

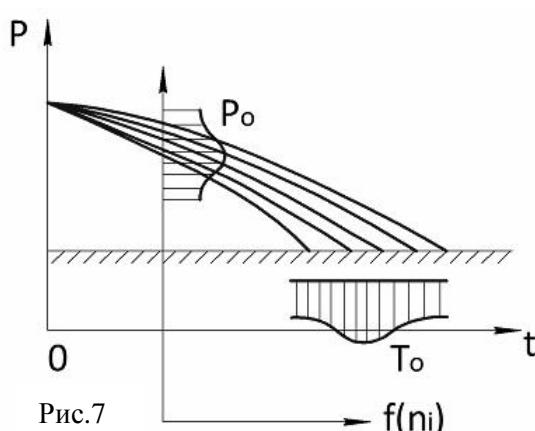


Рис.7

Мерой параметрической надежности является вероятность того, что параметры, определяющие состояние изделий не выходят за обусловленные пределы.

Характер процесса детерминирован (он определяется влиянием процессов, происходящих в двигателе, а также внешними факторами), а разброс параметров – явление случайное, т. к. он определяется



погрешностью в пределах допусков в процессах сборки, настройки, испытания и т.д.

Если разбросы случайны, то теоретической основой их определения является «Теория вероятностей». Если двигатель ставится а стенде, то он (как правило) никогда не дает параметры. Имеет место параметрическая ненадежность. Если произошел функциональный отказ (взрыв двигателя), то это пример функциональной ненадежности.

Иногда параметрическая ненадежность переходит в функциональную и наоборот

## 1.2 Место надежности в системе эффективности авиационного и ракетостроительного комплекса (АРКК)

АРКК, с точки зрения обывателя, является транспортным средством.

Требования к транспортному средству:

- Безотказность. Самый безопасный – гужевой, самый опасный – морской.
- Готовность, т. е. сроки полета.
- Живучесть (восприимчивость к внешним
- Скорость.
- Стоимость.

Надежность определяется качеством изделий и качеством людей. АРКК состоит из технологических объектов применения, сооружений, обслуживающего персонала, пилотов и пассажиров.



Под эффективностью понимают совокупность свойств, определяющих получение некоего эффекта при использовании изделия по назначению.

Эффект может быть любым (экономическим, политическим, научным, социальным и т. п.). Все эффекты связаны между собой.

*Качество* – совокупность свойств, характеризующих возможность использования по назначению изделий или людей.

*Техническое совершенство* – совокупность свойств, характеризующих уровень параметров изделия, свойств материалов, технологий, а также его характеристики (экономических, эстетических, нравственных, экологических и т. п.). Основным отличием параметров надежности от параметров технического совершенства является то, что первое зависит от времени, а второе нет.

*Квалификация* – степень обученности персонала.

*Исполнительность* – свойство безошибочного выполнения задания в требуемый срок.

*Безотказность* – свойство изделия не причинять вреда здоровью человека при возникновении отказа (локализация разрушений).

*Готовность* – свойство изделия быть готовым к применению в требуемый момент времени кроме тех, в которые его применение запрещено НТД (старт ракеты запрещен во время грозы, или при резком изменении температуры).

*Живучесть* – свойство изделия обеспечивать работоспособное состояние при возникновении нештатной ситуации.

Ситуация называется нештатной, если двигатель отрабатывался на ее возникновение. В двигатель попала птица. Это штатная ситуация, если проводились соответствующие испытания. В двигатель попало шесть птиц (RB211  $m \geq 6$  кг). Это – нештатная ситуация.

### ***1.3 Состояния и события, характеризующие надежность***

Процессы, происходящие с деталями двигателя и двигателей в целом, при изготовлении сборке, транспортировании, техническом обслуживании, применении, определяет техническое состояние двигателя.

Существует пять видов технического состояния:

1. Работоспособное (работоспособность);
2. Неработоспособное (неработоспособность);
3. Исправное (исправность);
4. Неисправное (неисправность);
5. Предельное состояние.

Работоспособным называется такое состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих выполнение изделием требуемых функций, удовлетворяется.

Эти параметры записаны в ТЗ. Если одно из требований ТЗ не удовлетворяется – изделие неработоспособно.

Помимо требований ТЗ существуют требования, которые являются внутренними.

Исправным (неисправным) состоянием называется такое состояние, при котором изделие соответствует (не соответствует) всем требованиям НТД.

В общем случае НТД состоит из:

1. Технического задания;
2. Конструкторской документации;
3. Технологической документации;
4. Технических условий;
5. Норм.

Конструкторскую документацию разрабатывают только разработчики. К ней относятся чертежи, описания, ТУ на изготовление, производство, сборку, испытания и применение.

К технологической документации относят технологии на изготовление, сборку и испытание. Есть ТУ министерские, обязательные для всех процессов.

К нормам относят разные правила САП-33, 6 Глава НЛГС ( ), ГОСТы, ОСТы, СТП, нормали (болты гостированы, а нормализованы). Изделие может быть неисправным, но работоспособным. Например, если двигатель покрасили в другой цвет.

Схема взаимосвязи состояний.



Возможные виды технического состояния изделия	Квалификация технического состояния изделия		
	Выполнение требований ТЗ и НТД	Выполнение требований ТЗ но не выполнение требований НТД	При невыполнении требований ТЗ
Работоспособность и исправность	+		
Неисправность но работоспособность		+	
Неработоспособность и неисправность			+

Предельным называют такое состояние двигателя, при котором его дальнейшая эксплуатация нецелесообразна или невозможна. По достижении ПС двигатель снимают с эксплуатации.

Причины предельного состояния:

1. Увод нормативов за допустимые пределы;
2. Опасность возникновения катастрофической ситуации, т.е. снижение уровня безопасной эксплуатации.
3. Моральное старение двигателя, т.е. создан новый двигатель с улучшенными параметрами.  
Может ли быть неисправное и работоспособное изделие в предельном состоянии? Да.

Событием называют переход изделия из одного состояния в другое.

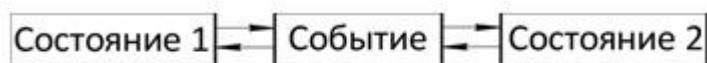


Рис. 9

Отказом называют переход из работоспособного состояния в неработоспособное.



Рис. 10

Структурная схема состояний и событий, характеризующих надежность.



Рис.11

*Ремонт* – переход от неработоспособного состояния к исправному и работоспособному.

Разница между восстановлением и ремонтом заключается в том, что при восстановлении работоспособного и исправного состояния обычно заменяют только отказавший элемент. При ремонте двигатель снимается с эксплуатации и отправляется на ремонтное предприятие, разбирается, дефектируется, составляется дефектная ведомость, заменяются детали, имеющие низкий остаточный ресурс и предпосылки к отказу, затем двигатель собирается и проходит испытания.

После ремонта гарантийный и надежностный ресурсы двигателя равны первоначальному, а при восстановлении эти ресурсы равны своим остаточным значениям. В этом – принципиальное отличие событий восстановления и ремонта.

*ППС* – событие «переход к предельному состоянию». После предельного состояния следует списание и утилизация.

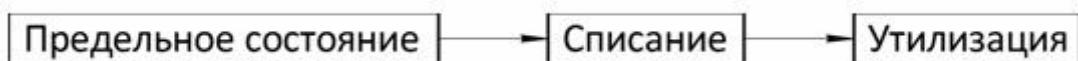


Рис. 12

Надежность характеризуют пять состояний и пять событий (повреждение, отказ, восстановление, ремонт, предельное состояние).



Рис.13

Списание характеризует надежность условно, а утилизация не характеризует совсем.

Дефект – каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным НТД. Дефект обнаруживают при дефектации изделия.

Обычно под подразумевают обобщенное понятия повреждения и отказа.

## 1.5. Классификация изделий

С позиции теории надежности изделия подразделяют на:

- Восстанавливаемые и невосстанавливаемые;
- Ремонтируемые и неремонтируемые.

Восстанавливаемым называют изделие, для которого в рассматриваемой ситуации, восстановление исправного или работоспособного состояния предусмотрено НТД.

Для ДЛА рассматриваемая ситуация – полет. С этой точки зрения все ДЛА являются невосстанавливаемыми изделиями («Экипаж»). Для всего времени эксплуатации ДЛА являются восстанавливаемыми изделиями, т.к. замена отдельных элементов допускается.

Если проведение ремонтов предусмотрено НТД, то такое изделие называют ремонтируемым. Неремонтируемое изделие проще по конструкции, и выполняется, как правило, неразборным. С точки зрения надежности изделия могут быть простыми и сложными.

Простыми называют изделия отказ которого происходит по причине отказа любого элемента. У сложного изделия не происходит отказа. С этой точки зрения, ДЛА является простым изделием. Силовая установка ЛА, состоящая из нескольких двигателей, является изделием сложным, т.к. благодаря резервированию, силовая установка обеспечивает требуемый уровень тяги.

Согласно нормам НЛГС, самолет обязан выполнить поставленную задачу при половине отказавших двигателей.

Классификация изделий (двигателей) позволяет определить потребное количество их для эксплуатации, количество инструмента, затраты на проведение обслуживания и ремонта, штатный состав персонала, материальные затраты, мощность предприятия, средства безопасности при обслуживании двигателя.

## 1.6 Классификация отказов

Поскольку отказ – событие, связанное с потерей работоспособности, то он занимает центральное место в теории надежности.

Классификация возможна по некоторым признакам:

1. По характеру потери работоспособности:
  - постепенные;
  - внезапные;
2. По зависимости отказов между собой:
  - Зависимые;
  - Независимые;

Если один отказ происходит вследствие другого, то это – зависимые отказы.

Разрушение крыльчатки ТНД  $\Rightarrow$  Разрушение корпуса  $\Rightarrow$  Разрушение двигателя.

3. По возможности одновременного возникновения отказов:
  - Совместные;
  - Несовместные.

4. Поэтому двигатель, на котором была заложена причина отказа:
  - Конструктивный;
  - Производственный;
  - Эксплуатационный.
5. По степени опасности отказы могут приводить к поломке, аварии и катастрофам.

Поломка – изделие можно отремонтировать. После аварии изделие восстановлению не подлежит. Событие связанное с гибелью людей (в течение 11 суток) называется катастрофой.

6. По последствии отказы бывают:
  - Отказы в полете, когда двигатель самопроизвольно или принудительно выключается в полете;
  - Отказы, приводящие к досрочному съему двигателя (до выработки гарантийного ресурса);
  - Отказы, устранимые в эксплуатации, при ремонтах в течение обслуживания.
7. По узлам двигателя.

Выберем два вида параметров:

$S$  – свойства или параметры конструкции.

$R$  – действительные значения этих параметров в определенный момент времени.

Всего возможно шесть различных схем:

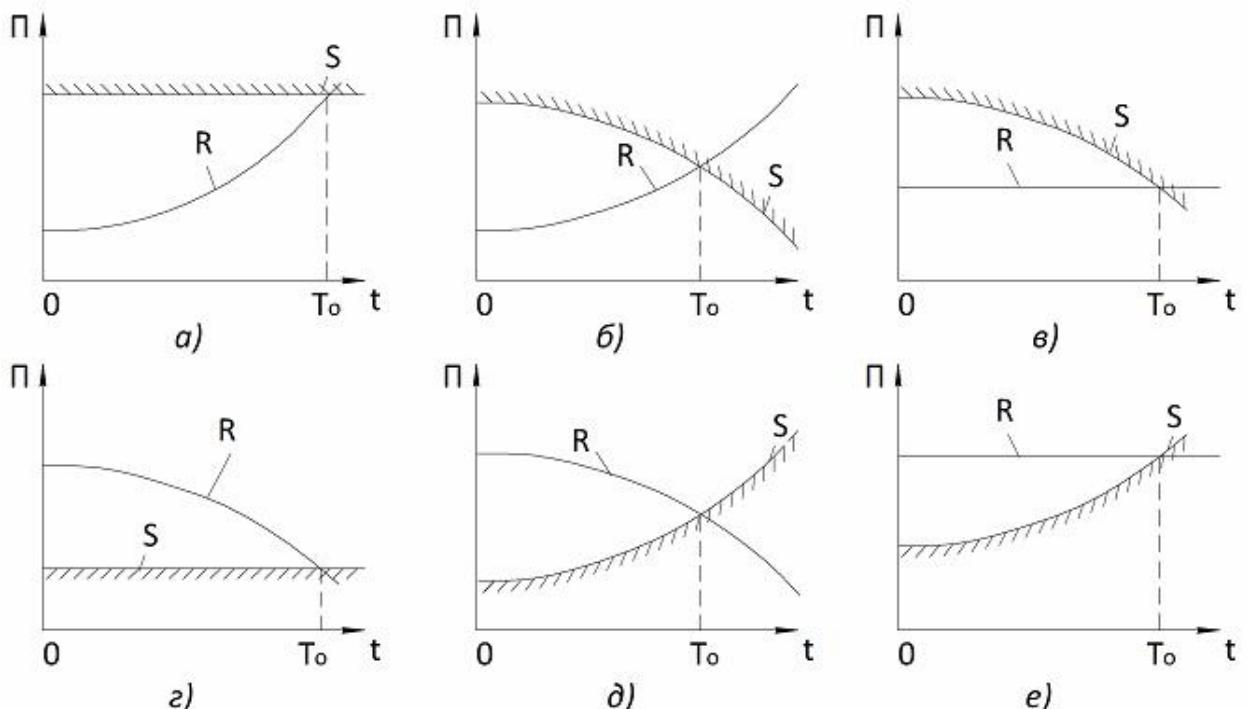


Рис.14

Рассмотрим схему А. Например – величина постоянная во времени, а действующие напряжения могут возрастать.

Рассмотрим схему Г. Стартовая тяга расчетного двигателя многоократного использования уменьшается стечением времени. (1986г. ТУ – 154 Ташкент – Минводы, 176 пассажиров, перегрузка 10 тонн).

Особенности постепенных отказов:

1. Они происходят вследствие деградационных процессов, т.е. старения, изнашивания, накапливания повреждений, ползучести, релаксации и т.п.;
2. Постепенные отказы имеют предысторию;
3. Если наблюдать за характером процессов  $S$  и  $R$ , то можно с определенной вероятностью прогнозировать момент возникновения отказа;
4. Закономерности протекания процессов  $S$  и  $R$  детерминированы, а момент возникновения отказа , является случайной величиной вследствие разброса параметров  $S$  и  $R$ ;
5. Если периодично осуществлять диагностический контроль, то можно очень точно определить  $T_0$ . Но здесь возникает противоречие между трудоемкостью и необходимостью контроля.

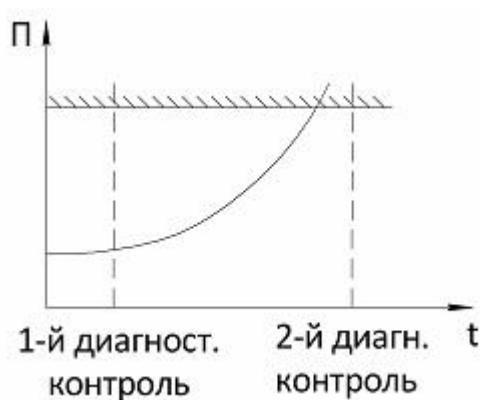


Рис.15

Внезапные – это отказы, при которых  $S$  или  $R$  (или одновременно) изменяются . Особенностью внезапных отказов является то, что момент времени { } меньше чувствительности аппаратуры, меньше чувствительности диагностирования.

Кавитация возникает за доли секунды и прибор может ее появление не поймать. Внезапные отказы не имеют предыстории, а причина есть.

Самыми опасными являются внезапные отказы, поэтому свести их к постепенным.

Модели внезапных отказов:

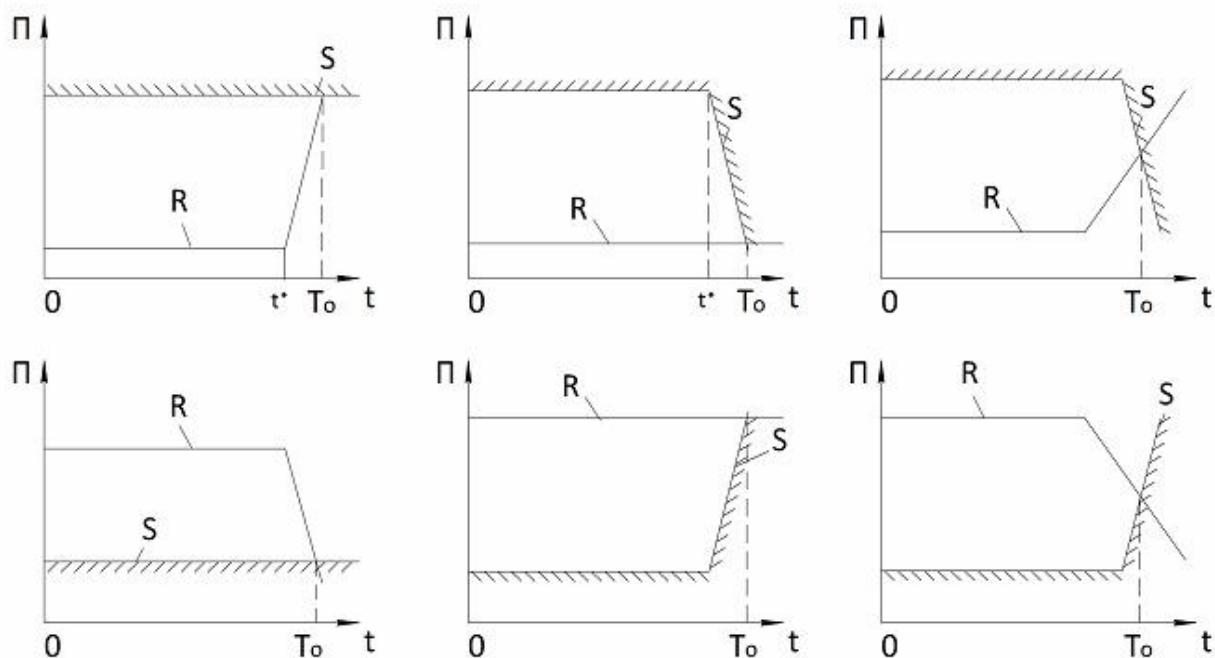


Рис.16

Диск был изготовлен из титана. Титан не регенерируется, т.е. при обработке существует способ ущемления производства дисков из титана: металлическую измельченную стружку добавляют в расплав. Никакими методами на возможно было обнаружить это включение стружки с среде титана. Также было показано, что рядом с включением существуют микроволны, число которых равно числу полетных циклов. Это пример внезапного отказа.

Конструктивный отказ – это отказ, связанный с нарушением правил и норм проектирования двигателя.

Причины:

1. Неверный выбор материалов. Некоторые материалы образуют гальваническую пару (напр. Mg + Cu). Это может произойти если диск сделать из Mg – сплава, а замки лопаток омеднить.
2. Неверное назначение шероховатости поверхности. В подшипниках скольжения и качения шероховатость должна быть требуемой, а не минимальной. Сохранить смазку в контакте возможно только за счет микронеровностей. Подшипник не будет работать с идеальными поверхностями.
3. Несоблюдение ГОСТов и ОСТов.
4. Грубые промахи.
5. Не учет опыта создания предшествующих изделий.

На двигателях НК – 32 был дефект разрушения лопаток НА. От дефекта ушли внутри в прокладку из МР в затурбинную опору. Тот же дефект был на двигателе НК – 6.

Производственный отказ возникает из-за несоблюдения при изготовлении, сборке, испытаниях и ремонте.

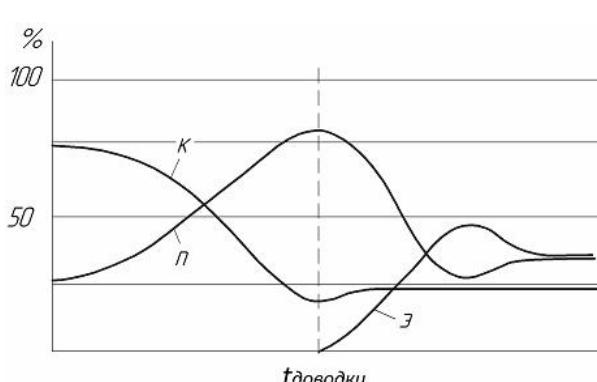
Эксплуатационные отказы возникают в результате на соблюдения правил, норм и «инструкции по эксплуатации».

Причины производственных отказов:

1. Низкая квалификация работников;
2. Несознательность и халатность исполнителей;
3. Усталость персонала из-за высокого качества двигателей. На одном двигателе может быть до пять тыс. штук лопаток.

Причины эксплуатационных отказов:

1. Низкая квалификация;
2. Халатность персонала.



Изменение КО, ПО и ЭО по наработке изделий.

Особенностью конструктивных отказов является то, что они проявляются в одних и тех же условиях, следовательно их легче обнаруживать.

Производственные отказы, как правило, случайные. Соотношение между отказами непостоянно. Когда говорят, что КО – 30%, ПО – 30%, ЭО – 40%, это, строго говоря, неверно.

Критерии отказов обязательно указывают в НТД. Как определить, является ли событие отказом?

Событие	Пилот	Механик АТБ	Пассажир
	Нет	Да	Нет
Коррозия	Нет	Да	Нет
Отрыв лопаток последней ступени турбины	Да (нет)	Да	Нет
	Нет	Да	Да

Катастрофа Ту-134 (в июле 83 г., около Ленинграда) научило мир, что понижение вибрации также опасно, как ее внезапное повышение.

Из-за появления трещины в диске, диск отклоняется и происходит снижение уровня вибрации.

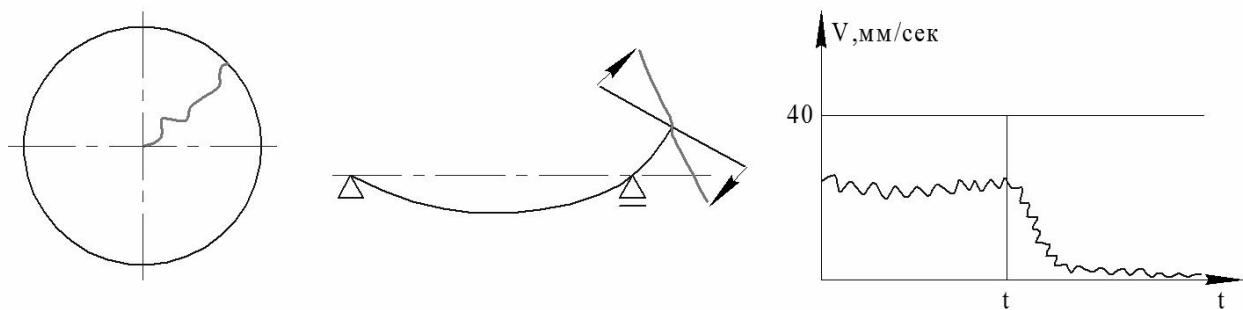


Рис.19

Двигатель с внезапным снижением вибрации необходимо сразу же снять с крыла и продефектовать.

## 1.7. Параметры надежности

Каждое свойство имеет свои показатели.

Надежность			
Безотказность	Долговечность	Ремонтопригодность	Сохраняемость
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <math>P(t)</math> - вероятность безотказной работы</li> <li>➤ <math>T_0</math> - наработка на отказ</li> <li>➤ <math>T_1</math> - наработка до отказа</li> <li>➤ <math>\lambda(t)</math> - интенсивность отказов</li> <li>➤ <math>\omega(t)</math> - параметр потока отказов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ресурс и его разновидности</li> <li>✓ Срок службы и его разновидности</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Вероятность восстановления в заданное время</li> <li>➤ Среднее время восстановления</li> <li>➤ Трудоемкость технического обслуживания и ремонта</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Вероятность сохранения в заданное время</li> <li>✓ Средний срок сохраняемости</li> </ul>

Рис. 20

Неправильно говорить «методы повышения надежности и ресурса». Надежность комплексное свойство и ресурс – показатель долговечности.

### 1.7.1. Показатели безотказности

#### 1.7.1.1. Вероятность безотказной работы (ВБР)

ВБР – это вероятность того, что в пределах заданной наработки  $t$  отказа не произойдет.

$$P(t) = \text{Bep} \{ t < T_1 \} \quad (2)$$



Рис. 21

Если в эксплуатации находится  $N$  работоспособных двигателей, а при наработке  $t$  работоспособными остались только  $N(t)$ , то:

$$N(t) = N - n(t), \text{ где} \quad (3)$$

$n(t)$  - число отказавших двигателей.

Тогда

$$\mathbb{P}(t) = \frac{N(t)}{N} \quad (4)$$

«%

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} \quad (5)$$

$Q(t)$  - вероятность отказа, т.е. вероятность того, что при наработке  $t$  двигатель будет неработоспособным.

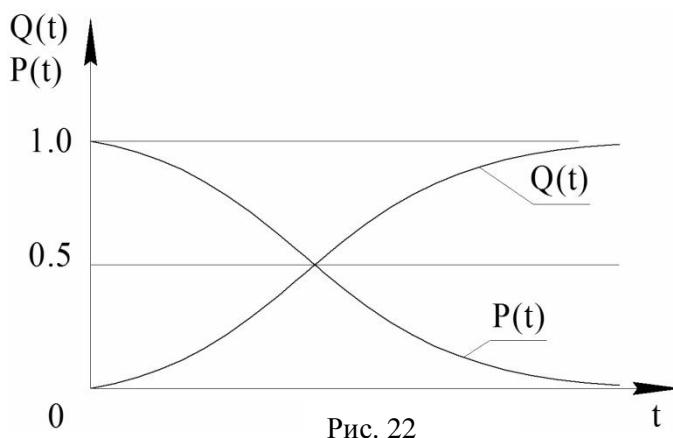
$$Q(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (6)$$

Если  $N \rightarrow \infty$ , то  $P(t) \rightarrow P(t)$ , а  $Q(t) \rightarrow Q(t)$

$$P(t) + Q(t) = 1 \quad (7)$$

$P(t)$  и  $Q(t)$  составляют полную группу событий.

$$P(t) = 1 - Q(t) \quad (8)$$



Зависимость ВБР от времени называют кривой убыли.

Свойства ВБР:

- При  $t = 0$  все изделия работоспособны, т.е. отказов нет.
- При  $t \rightarrow \infty, P(\infty) = 0$ . При бесконечно большой наработке все модели откажут.
- Кривая убыли является монотонно убывающей функцией.

Ресурс двигателя должен быть обоснован. Некорректно говорить о неограниченном увеличении ресурса, как о главной цели создания двигателя. (Ресурс 6000 часов для ЛА – это примерно 30 лет эксплуатации). Аналогично д.б. обоснована ВБР.

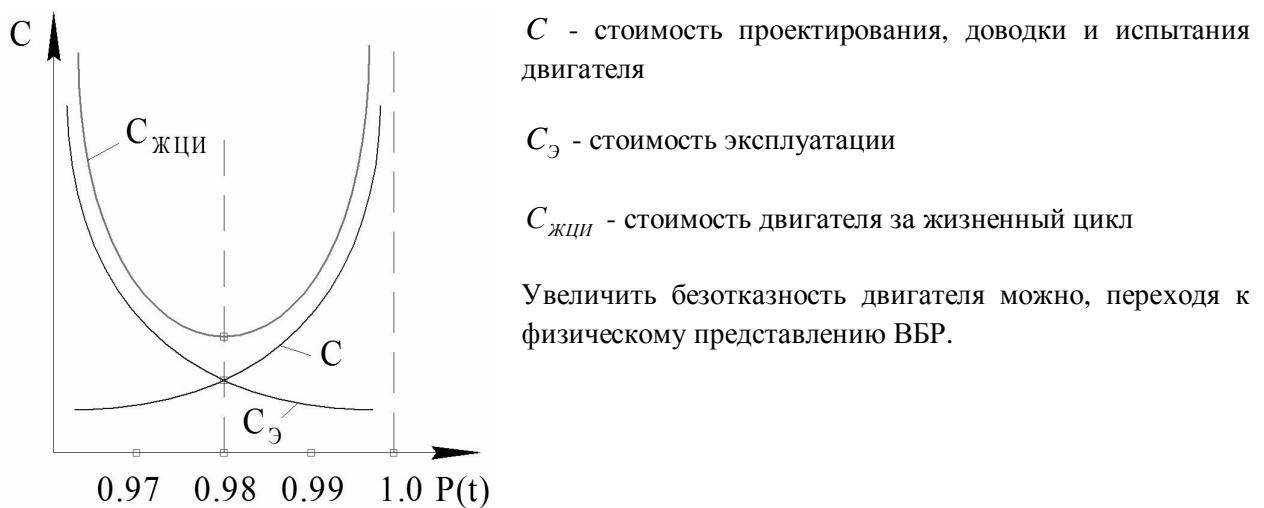


Рис. 23

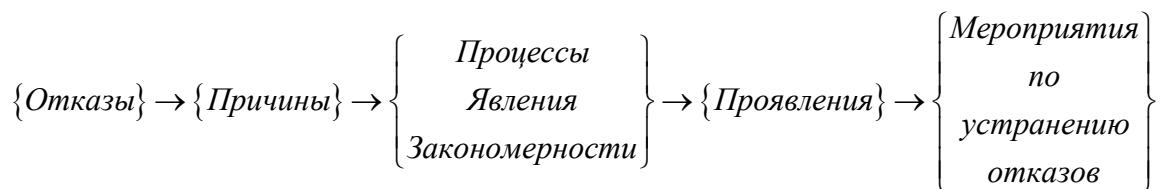


Рис.24

Увеличение ВБР по ЖЦИ для восстанавливаемого изделия.

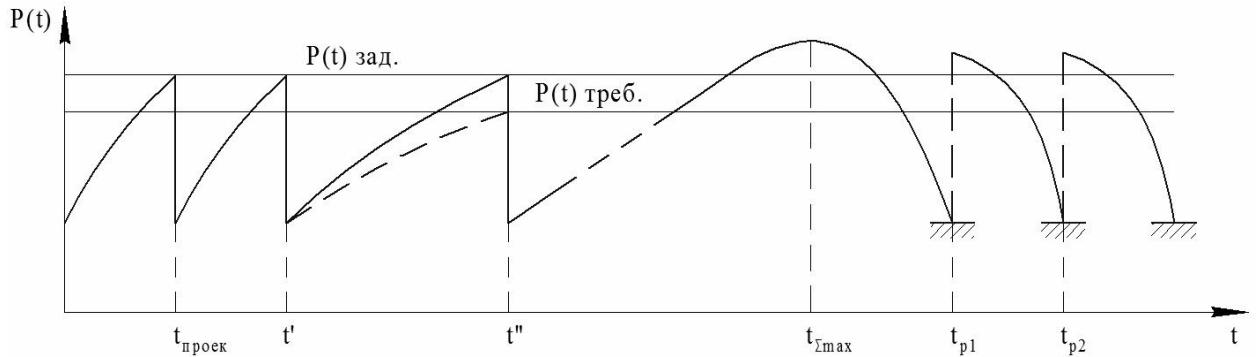


Рис. 25

$P(t)_{зад}$  - заданный уровень ВБР

$t'$  - время изготовления опытного образца

$t''$  - время доводки

$P(t)_{треб}$  - параметры, которые необходимо достичь для начала эксплуатации

$t_{p(1)}$  - время ремонта

Эксплуатация МЛ – 96 (с ПС – 90А) началось со 100 часов и в н.в. доведено до 1000 ч.

Высочайший уровень надежности достигается при  $t_{\Sigma \max} = 10^7$  ч. (для авиационных двигателей).

Важно, что  $t_{p3} - t_{p2} < t_{p2} - t_{p1} < t_{p1} - t_{p_{-дог}}$

Обычно имеются 2..3 ремонта.

#### 1.7.1.2. Наработка до отказа

$T_1$  - это математическое ожидание времени первого отказа:

$$T_1 = M(t_{omk}) = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t) dt = 1 \quad (9)$$

Так как в задачах надежности время всегда изменяется от нуля:

$$T_1 = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (10)$$

$f(t)$  - плотность распределения времени отказов, равная пределу отношения вероятности того, что случайная величина находится в каком-то интервале и продолжительность этого интервала:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Bep \{t \leq T_1 \leq t + \Delta t\}}{\Delta t} \quad (11)$$

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (12)$$

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \quad (13)$$

$$T_1 = - \int_0^{+\infty} t \cdot dP(t) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} d[t \cdot P(t)] &= P(t)dt + t \cdot dP(t) \\ t \cdot dP(t) &= d[t \cdot P(t)] - P(t)dt \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14) получим:  $T_1 = - \int_0^{+\infty} d[t \cdot P(t)] + \int_0^{+\infty} P(t)dt = -t \cdot p(t) \Big|_0^{+\infty} + \int_0^{+\infty} P(t)dt = \int_0^{+\infty} P(t)dt$

$$T_1 = \int_0^{+\infty} P(t)dt \quad (16)$$

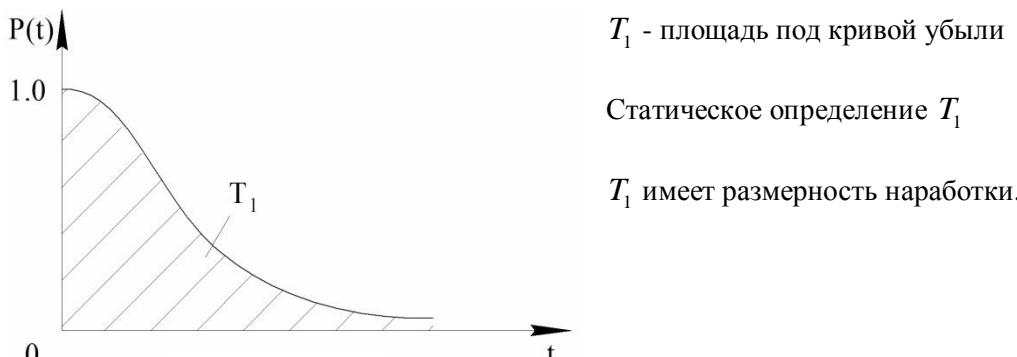


Рис. 26

Пусть проходит испытание 5 двигателей. Двигатели отказали в следующие моменты времени:

I    20 с   35 с   50 с   120 с

II   80 с   130 с   180 с

III 50 с   180 с

IV 5 с   120 с   150 с

V   10 с   20 с   40 с   80 с   150 с

Испытания проводились в течении 200 с.

Обычно  $T_1$  используют для невосстанавливаемых двигателей. Возможно использовать  $T_1$  для восстанавливаемых двигателей, если анализируются закономерности появления первого отказа.

$$\bar{T}_1 = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \quad (17)$$

$$\bar{T}_1 = \frac{20+80+50+5+10}{5} = 33 \text{ с.}$$

### 1.7.1.3. Наработка на отказ $T_0$

$T_0$  - отношение периода наработки к математическому ожиданию количества отказов за этот период.

$$T_0 = \frac{t_2 - t_1}{m_{cp}(t_2) - m_{cp}(t_1)} \quad (18)$$

$t_1, t_2$  - моменты времени;

$m_{cp}(t_1), m_{cp}(t_2)$  - математическое ожидание количества отказов при наработке  $t_1$  и  $t_2$ .

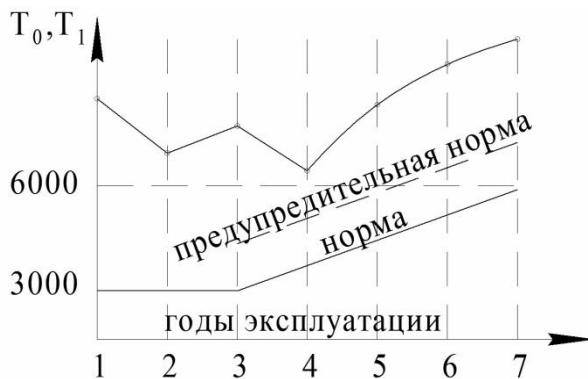
$$m_{cp}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t)}{N}$$

Пусть в рассматриваемом примере  $t_1 = 100c, t_2 = 180c$ .

$$m_{cp}(t_2) = m_{cp}(180) = \frac{4+3+2+3+5}{5} = 3.4$$

$$m_{cp}(t_1) = m_{cp}(100) = \frac{3+1+1+1+4}{5} = 2$$

$$T_0 = \frac{180 - 100}{3.4 - 2} = \frac{80}{1.4} = 57.1 \text{ сек.,}$$



Т.е через каждые 57 с будет происходить один отказ.

Существуют нормы на  $T_1$  и  $T_0$ .

Если реальная кривая приближается к предупредительной норме, то собирается отраслевая комиссия для выработки рекомендаций. В СССР уровень безопасности полетов был в два раза выше, чем в США.

### 1.7.1.4. Интенсивность отказов $\lambda(t)$

$\lambda(t)$  - условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объема, определяемая для рассматриваемого времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Bep\{t \leq T_0 \leq t + \Delta t\}}{\Delta t}$$

Для изделия безотказно проработавшего время  $t$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Bep \{ t \leq T_0 \leq t + \Delta t \}}{\Delta t}$$

Пусть  $n(t)$  - число отказов в момент времени  $t$ .

$n(t + \Delta t)$  - число отказов в момент времени  $t + \Delta t$

$$\Delta n(t) = n(t + \Delta t) - n(t) \quad (19)$$

$$f(t) \square \frac{\Delta n(t)}{N \Delta t} \quad (20)$$

$N$  - общее число изделий.

$f(t) \cdot \Delta t$  - вероятность отказа любого из общего числа изделий.

$$\lambda(t) \square \frac{\Delta n(t)}{N(t) \cdot \Delta t} \quad (21)$$

$N(t)$  - число исправных изделий в момент  $t$ .

$\lambda(t) \cdot \Delta t$  - вероятность отказа только тех устройств, которые остались работоспособными к моменту времени  $t$ .

$$\lambda(t) = \frac{dn(t)}{N(t)dt} = \frac{dn(t) \cdot n}{N(t) \cdot dt \cdot N} = \frac{f(t)}{p(t)} \quad (22)$$

$$\int_0^{+\infty} f(t)dt > 1$$

$$\int_0^{+\infty} \lambda(t)dt = \int_0^{+\infty} \frac{f(t)}{p(t)} d(t) \neq 1$$

$\lambda(t)$  - не обладает основными свойствами  $f(t)$

$\lambda(t)$  - имеет размерность обратную наработке

$$[\lambda(t)] = \left[ \frac{1}{c} \right] = \left[ \frac{1}{\eta} \right]$$

Параметр  $\lambda(t)$  используют только для невосстанавливаемых устройств.

Для приведенного примера определим  $\lambda(20)$  для периода времени  $t_1 = 20c, t_2 = 60c$ .

$$\lambda(20) = \frac{n(60) - n(20)}{2(60 - 20)} = \frac{4 - 3}{2 \cdot 40} = \frac{1}{80} = 0.125c^{-1}$$

Доля изделий, которые отказывают в единицу времени после момента времени  $t$ .

#### 1.7.1.5. Параметр потока отказов $\omega(t)$

Если обозначить через  $Q(t)$  вероятность появления отказа в промежуток времени  $(t_1, t_2)$ , то параметр потока отказов определяется по формуле:

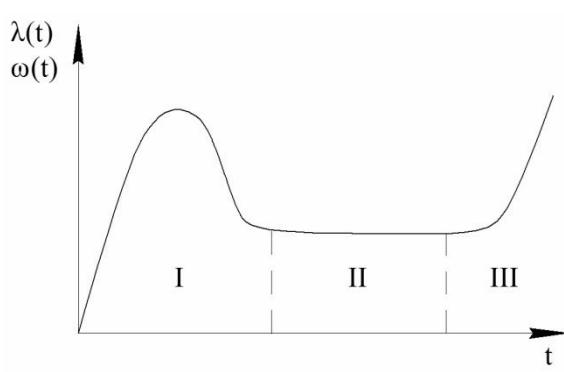
$$\omega(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \Delta t} = \frac{m_{cp}(t_2) - m_{cp}(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (24)$$

Если сравнивать (24) и (18), то мы сможем установить, что

$$\omega(t) = \frac{1}{T_0} \quad (25)$$

Формула (25) справедлива для любого закона распределения.

И интенсивность отказов, и параметр потока отказов имеют одинаковый характер изменения по наработке.



Можно выделить три характерных участка (этапа)

Первый этап – этап приработки, на этом этапе устраняются все проявляющиеся отказы и неисправности, обусловленные конструкторскими ошибками (для опытного двигателя), неточностями изготовления и сборки, неопытностью испытателей.

Второй этап – этап нормальной эксплуатации.

Этот этап подчиняется экспоненциальному закону и на нем происходят только внезапные отказы.

Третий этап – этап старения (деградации). Здесь складываются наличия повреждений, выносливость материала, изнашивание, старение материалов, ползучесть, релаксация и др. процессы.

Поскольку и  $\lambda(t)$  и  $\omega(t)$  имеют одинаковый характер изменения по наработке, то эту характеристику называют  $\lambda$  - характеристикой. Эта характеристика имеет глобальные значения и ее знают все страховые и торговые компании. Уровень смертности в детском возрасте имеет пик, после 35 лет смертность снова начинает возрастать (Именно поэтому в советских паспортах было три фотографии. Она непостоянна для различных предприятий и сроков выпуска изделия). Можно считать, что  $\lambda$  - характеристика является надежностным паспортом изделия.

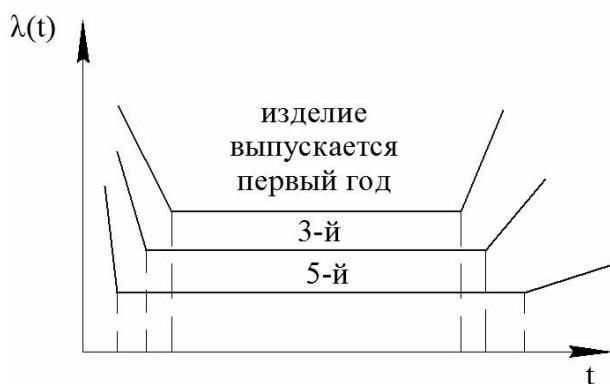


Рис.29



Рис.30

### 1.7.2. Параметры долговечности

Ресурс – наработка изделия от начала эксплуатации или ремонта определенного вида до наступления предельного состояния.

Ресурс имеет следующие основные разновидности:

1. Гарантийный ресурс – суммарная наработка двигателя в течении которой ответственность за сохранение работоспособности несет поставщик.
2. Назначенный ресурс – суммарная наработка изделия, при достижении которой, двигатель снижается с эксплуатации вне зависимости от технического состояния.

При эксплуатации по техническому состоянию, вместо назначенного ресурса используют понятие разрешенная наработка.

3.  $\gamma$  - процентный ресурс. Это ресурс, который достигается с вероятностью  $\gamma$  - процентов.

Например, 95% ресурс составляет 5000 часов. Это означает, что 5% двигателей откажут к этому времени.

Срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации от ее начала до наступления предельного состояния при заданной системе технического обслуживания и ремонта.

Если двигатель многоразового применения, то



Рис.31

### 1.7.3. Показатели сохраняемости

Гамма – процентный срок сохраняемости, т.е. срок сохраняемости, который будет достигнут объемом с заданной вероятностью  $\gamma$  % .

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

### 1.7.4. Показатели ремонтопригодности

(см. определения)

Все рассмотренные параметры являются единичными, т.к. они характеризуют только одно из свойств надежности. В противном случае параметр будет комплексным.

Например,  $K_e$  - коэффициент готовности.

к применению, кроме моментов, когда его использование запрещено НТД.

$$K_e = \frac{T_0}{T_0 + T_B} \quad (26)$$

$T_0$ - наработка на отказ	в США $K_e = 0.98$
$T_B$ - время восстановления	в СССР $K_e = 0.99$
	в РФ $K_e = 0.9$

### 1.8. Основные уравнения надежности

Желательно установить связь между параметрами надежности.

Пусть, имеем  $N$  работоспособных изделий. При наработке  $t$  отказалось  $n(t)$  изделий. Тогда число исправных изделий:  $N(t) = N - n(t)$

ВБР:

$$P(t) = \frac{N(t)}{N} = 1 - \frac{n(t)}{N} \quad (5)$$

Продифференцируем уравнение 5:

$$\begin{aligned} \frac{dP(t)}{dt} &= -\frac{dn(t)}{Ndt} \\ \frac{dP(t)}{dt} &= -\frac{dn(t)}{Ndt} \cdot \frac{N(t)}{N(t)} \\ \frac{dP(t)}{dt} &= -P(t) \cdot \lambda(t) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\lambda(t)dt$$

$$\int_0^t \frac{dP(t)}{dt} dt = - \int_0^t \lambda(t) dt$$

$$\ln P(t) \Big|_0^t = - \int_0^t \lambda(t) dt$$

Т.к.  $\ln P(0) = 0$ , то

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

$$P(t) = e^{- \int_0^t \lambda(t) dt} \quad (28)$$

(28) – основное уравнение надежности, оно связывает  $P(t)$  с  $\lambda(t)$ .

### 1.9. Основные закономерности времени безотказной работы

В н.в. выведено и подобрано около 2500 законов распределения. Рассмотрим 3 закона.

- I. Экспоненциальное распределение.

Если в выражении (28) наложить  $\lambda(t) = \lambda = const$ , то получим:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t} \quad (29)$$

Тогда

$$f(t) = P(t) \cdot \lambda(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (30)$$

$$T_1 = \int_0^{+\infty} P(t) dt = \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} d(-\lambda t) = \frac{1}{\lambda} \quad (31)$$

Если сравнить формулу (25) -  $\omega(t) = \frac{1}{T_0}$  и формулу (31), то по внешнему виду они совпадают. Но формула (25) справедлива для любого закона распределения, а формула (31) только для экспоненциального.

Особенности экспоненциального закона.

1. Согласно формуле (30) этот закон несимметричен. Плотность распределения отказов  $f(t)$  имеет максимальное значение при  $t = 0$ .
2. Из формулы (30) следует, что экспоненциальное распределение – однопараметрическое и параметром распределения является  $\lambda$ .
3.  $T_1$  (наработка до отказа) также является параметром распределения (31). Т.е. математическое ожидание времени появления первого отказа тоже является параметром экспоненциального распределения.
4. Для экспоненциального распределения математическое ожидание времени появления первого отказа равно среднему квадратичному отклонению.

$$\sigma^2 = \int_0^{+\infty} f(t)(t - M)^2 dt = T_1 \quad (32)$$

Вывести самостоятельно.

Из (32) следует, что время безотказной работы имеет огромный разброс, и в этом – большой недостаток экспоненциального закона.

5. На режиме нормальной эксплуатации ( $\lambda = const$ ) происходят только внезапные отказы.

#### Доказательство:

Рассмотрим сложное событие от начала наработки до некоторого времени  $t$ . Во время наработки  $t + \Delta t$  изделие имеет ВБР  $P(t + \Delta t)$ .

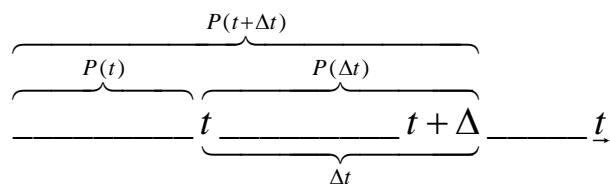


Рис.32

Тогда:

$$P(t + \Delta t) = P(t) \cdot P(\Delta t) \quad (33)$$

$$P(\Delta t) = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} = \frac{e^{-\lambda(t+\Delta t)}}{e^{-\lambda t}} = \frac{e^{-\lambda t} \cdot e^{-\lambda \Delta t}}{e^{-\lambda t}} = e^{-\lambda \Delta t} \quad (34)$$

Т.е. ВБР в интервале  $\Delta t$  после наработки  $t$  не зависит от предыдущей наработки или от предыстории. Это и есть свойство внезапных отказов.

$\lambda$  - характеристика позволяет ответить на вопрос, какой двигатель является двигателем большого (малого) ресурса?

Например, создано два двигателя с ресурсом 10 000 и 30 000 ч. соответственно. Если двигатель эксплуатируется на II участке  $\lambda$  - характеристики, то это двигатель малого ресурса. Двигатель большого ресурса работает на III-м этапе.

## II. Нормальный закон (Гаусса)

Плотность распределения случайной величины:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} \quad (35)$$

$$P(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{+\infty} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{+\infty} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} d\left(\frac{t-M}{\sigma}\right) \quad (36)$$

Обозначим:  $u = \left(\frac{t-M}{\sigma}\right)$ , тогда  $P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{+\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$

$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{u^2}{2}} du$  - называется функцией Лапласа или интегралом вероятности.

$$\Phi(0) = 0; \Phi(\infty) = 0.5$$

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{+\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{u^2}{2}} du = 1 - \Phi(t) \quad (37)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{1 - \Phi(t)} \quad (38)$$

$$T_1 = \int_0^{+\infty} (1 - \Phi(t)) dt \quad (39)$$

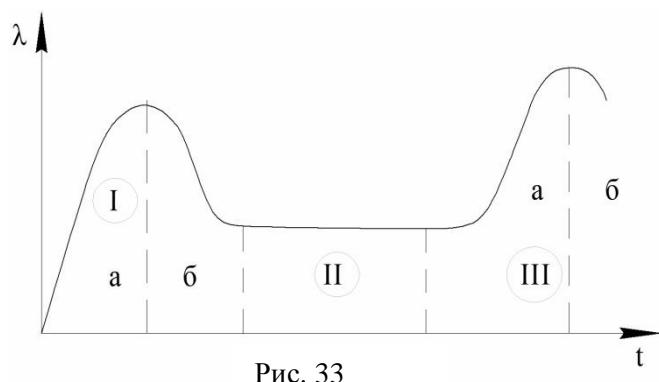


Рис. 33

Нормальный закон является двухпараметрическим.

Он описывает, строго говоря, III-й этап эксплуатации, на котором происходят одновременно внезапные и постоянные отказы.

Особенности нормального закона:

1. Нормальный закон симметричен относительно математического ожидания.
2. Нормальный закон двухпараметрический  $M$  и  $\sigma$ .
3. Параметры  $M$  и  $\sigma$  независимы. Чем больше  $M$ , тем больше кривая сдвигается вправо, а чем больше  $\sigma$ , тем кривая пологее.

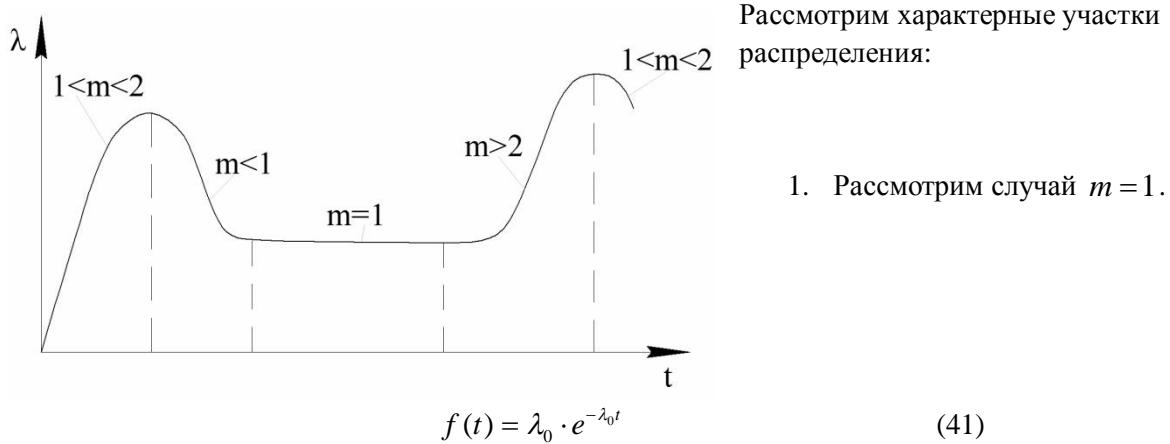
### III. Распределение Вейбулла.

Закон Вейбулла не выведен, а подобран.

$$f(t) = m \cdot \lambda_0 \cdot t^{m-1} e^{-\lambda_0 t^m} \quad (40)$$

$m$  - коэффициент распределения,  $m > 0$

$\lambda_0$  - масштаб кривой,  $\lambda > 0$ .



Распределение совпадает с экспоненциальным законом.

2.  $m = 2$ , тогда

$$f(t) = 2 \cdot \lambda_0 \cdot t \cdot e^{-\lambda_0 t^2} \quad (42)$$

3.  $1.0 < m < 2.0$
4.  $m > 2.0$
5.  $m < 1.0$

$$P(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt = \int_t^{+\infty} m \cdot \lambda_0 \cdot t^{m-1} e^{-\lambda_0 t^m} dt = - \int_t^{+\infty} e^{-\lambda_0 t^m} d(-\lambda_0 t^m) = -e^{-\lambda_0 t^m} \Big|_t^{+\infty} = e^{-\lambda_0 t^m} \quad (42)$$

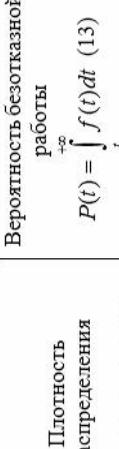
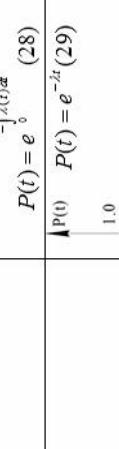
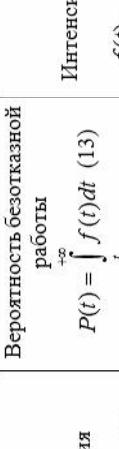
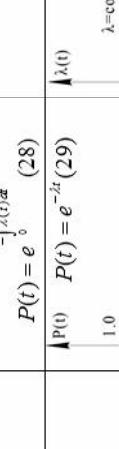
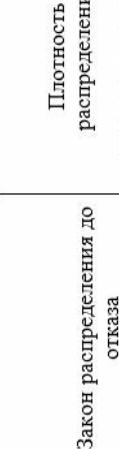
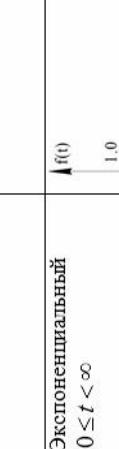
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{m \cdot \lambda_0 \cdot t^{m-1} e^{-\lambda_0 t^m}}{e^{-\lambda_0 t^m}} = m \cdot \lambda_0 \cdot t^{m-1} \quad (43)$$

$$T_1 = \int_0^{+\infty} P(t) dt = \int_0^{+\infty} e^{-\lambda_0 t^m} dt = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}{\lambda_0^{\frac{1}{m}}} \quad (44)$$

$\Gamma(x)$  - гамма – функция.

Анализ закономерностей изменения ВБР и  $\lambda$  - характеристики позволяет сделать следующие выводы:

*Основные соотношения для показателей безотказности при различных законах распределения времени до отказа*

Закон распределения до отказа $0 \leq t < \infty$	Плотность распределения $f(t) = P(t) \cdot \lambda(t)$ (22)	Вероятность безотказной работы $P(t) = \int_t^{\infty} f(t')dt$ (13)	Интенсивность отказов $f(t) = P(t) \cdot \lambda(t)$ (22)	Наработка до отказа $T_1 = \int_0^{+\infty} P(t)dt$ (16)	Область применения закона распределения
Экспоненциальный				$T_1 = \frac{1}{\lambda}$ (31)	Используется на режиме нормальной эксплуатации (II этап) и описывает внезапные отказы
Нормальный (Гаусса) $(-\infty \leq t < +\infty)$				$T_0 = M$	Используется на III-м участке
Закон Вейбулла	$0 \leq t < \infty$			$T_1 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}{\lambda_0^{\frac{1}{m}}}$ (44)	Закон Вейбулла описывает все этапы и участки характеристики при различных значениях $m$ . В частности, этап приработки хорошо описывается при $m = 0, 6, 0, 7$ . В этом заключается универсальность закона Вейбулла.

- До сдачи изделия в эксплуатацию необходимо провести контрольно-сдаточные испытания для приработки двигателя.
- Профилактическая замена отказавших деталей на другие (неусовершенствованные) целесообразно только на III-м этапе. При отказе на I-м или II-м этапах целесообразно усовершенствование.
- Двигатель многократного включения, успешно проработавший несколько запусков более надежен, чем только поставленный на стенд.
- При проведении различных видов испытаний их целесообразно совмещать.

*2. Расчёт и оценка надёжности на этапе проектирования.*

*2.1. ТЗ на проектирование и требования по надёжности, содержащиеся в нем*

При получении ТЗ конструктор учитывает особенности и отличия вновь создаваемого двигателя от двигателя прототипа, а также весь отечественный и мировой опыт создания двигателей.

Подсчёт показателей надёжности на этапе проектирования имеет низшую достоверность из-за того что:

1. Новый двигатель создается для новых условий эксплуатации, и влияние новых факторов может быть выяснено только с началом эксплуатации;

2. Новые двигатели имеют модернизированную конструктивно силовую схему, используются новые конструкторские и технологические решения, новые материалы, поведение которых при продолжительной эксплуатации будет выявлено лишь в течение большой наработки;
3. Статистика по отказам двигателя-прототипа из-за высокой его надёжности имеет небольшую выборку, т.е. отказы определенного типа одиночны.

Расчёты показателей надёжности на этапе конструирования позволяют сравнивать различные варианты между собой.

В ТЗ на проектирование двигателя предусматриваются следующие разделы:

1. Наименование и условные обозначения (шифр, индекс), разработчик;
2. Основание для разработки;
3. Цель разработки и назначение изделия;
4. Тактико-технические требования:
  - 4.1 Тактические требования;
  - 4.2 Технические характеристики;
  - 4.3 Состав изделий;
  - 4.4 Требования к конструкции и технологией изготовления;
  - 4.5 Требования к сырью, исходным материалам и покупным изделиям;
  - 4.6 Специальные требования;
  - 4.7 Требования по надёжности;
  - 4.8 Эксплуатационные и ремонтные требования;
  - 4.9 Требования к упаковке и маркировке;
  - 4.10 Требования к хранению и транспортированию;
5. Требования к стандартизации и унификации;
6. Технико-экономические показатели;
7. Эргономические требования;
8. Порядок разработки, испытания изделия, приёмки и окончании работ;
9. Требования обеспечения секретности на всех этапах ЖЦИ;
10. Приложения.

В подразделе 4.7 обязательно указывается:

- ✓ номенклатура показателей надёжности и их значения;
- ✓ критерии отказов (разделение работоспособного и неработоспособного состояния);
- ✓ критерии предельного состояния изделия;
- ✓ основные методы оценки соответствия изделия требованиям по надёжности на различных этапах ЖЦИ;
- ✓ методы испытаний и исходные данные для их планирования;
- ✓ характеристики условий и режимов эксплуатации, а также условий ремонта;
- ✓ требования к составлению программ по обеспечению надёжности (ПОН).

При оценке надёжности на стадии проектирования исходят из 2-х подходов:

1. метод физической надёжности;
2. метод структурной (схемной) надёжности.

Физическая надёжность – свойства отдельных элементов изделий, определяемая свойствами материала и конструкций, условиями работы и действующими нагрузками.

Схемная (структурная) надёжность – свойство изделий сохранять работоспособное состояние при наличии отказов отдельных элементов.

Схемная надёжность определяется как физической надёжностью элементов, так и структурно силовой схемой, а также взаимосвязью всех элементов изделий.

Для расчётов показателей надёжности используют различные методы, в т.ч.:

1. Метод структурных схем;



2. Метод логических схем.

## 2.2. Метод структурных схем

### 2.2.1. Общие замечания по построению ССХ

1. Структурная схема представляет собой условное изображение элементов надёжности, способов их соединения и взаимосвязи. Под элементами надёжности будем понимать как элементы конструкции, так другие понятия (режимы, дополнительные нагрузки, траектории полёта);
2. Выбирается принципиальная, или функциональная схема;
3. Элементы надёжности целесообразно детализировать до такого уровня, по которому имеется достоверная статистика и чтобы не усложнить схему элементами, имеющими высокую надёжность;
4. Некоторые элементы работают не всё время полёта, поэтому для определения показателей надёжности их необходимо приводить по всему времени полёта:

Пример:

a.  $T_{1\phi k \text{ пр}} = \frac{t_{\text{пол}} \cdot \lambda_1}{t_{\phi k}} T_{1\phi k}$

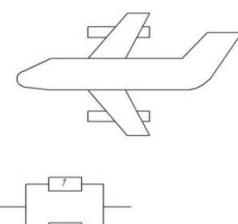
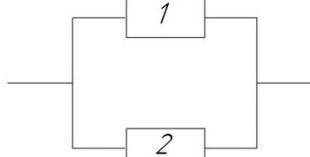
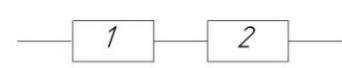
b. Разные агрегаты работают на разных режимах на разных участках полёта (СТГ – стартёр - генератор)

$$t_{\text{наз}} = t_{cm} + t_e; \lambda_{cmz} = \frac{\lambda_{cm} \cdot t_{cm} + \lambda_e \cdot t_e}{t_e + t_{cm}}$$

c. Некоторые элементы работают циклами:

$$\lambda = \frac{z_u \cdot \lambda_1}{t_{\text{наз}}}, z_u - \text{количество циклов.}$$

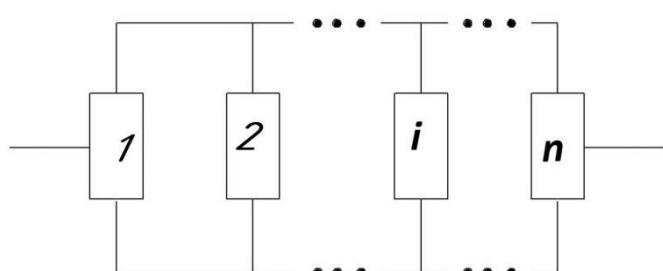
5. Структурная схема не всегда совпадает с принципиальной схемой соединения элементов.

Принципиальная схема расположения двигателей на самолёте	Структурная схема СУ, если НЛГС	
	удовлетворяет	Не удовлетворяет
		

6. В структурной схеме элементы надёжности могут соединяться последовательно или параллельно.



Рис. 34



Последовательным соединением элементов надёжности называют такие соединения



необходимым и достаточным условием отказа которого является отказ любого элемента.

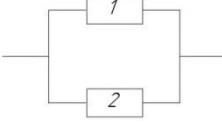
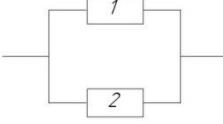
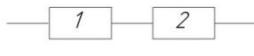
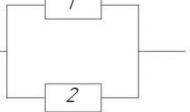
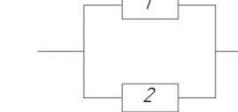
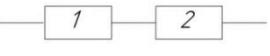
Параллельным называется такое соединение элементов, необходимым и достаточным условием отказа которого, является отказ всех элементов.

Пример:

Фильтр, назначение которого отфильтровывать элементы несгоревшего пороха.

Отказами фильтра являются:

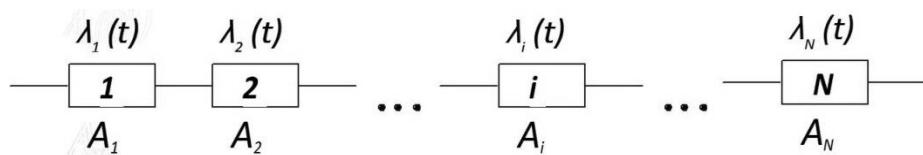
- - прорыв фильтроэлемента под действием запуска;
- - прогар фильтроэлемента;
- - засорение фильтроэлемента.

Принципиальная схема соединения фильтров	Структурная схема, если для фильтра опасно событие		
	прорыв	прогар	засорение
			
			

7. Метод структурных схем прост, но может использоваться при следующих условиях:

- все элементы СС<sub>Х</sub> должны быть одноотказными;
- все отказы д.б. независимыми;
- элементы надёжности не должны отрицать друг друга;
- все элементы д.б. одинарными, т.е. одно и тоже событие обозначает один элемент.

#### 2.2.2. Расчёт показателей надёжности при последовательном соединении элементов.



При последовательном соединении элементов используется теория вероятности:

$$P(t) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_i) \cdot \dots \cdot P(A_N) = \prod_{i=1}^N P(A_i) \quad (45)$$

$$P_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} \quad (46)$$

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^N \int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t (\sum_{i=1}^N \lambda_i(t)) dt} \quad (47)$$

$$P_c(t) = e^{-\int_0^t \lambda_c(t) dt} \quad (48)$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) \quad (49)$$

Из зависимостей (45) и (48) видно, что чем больше число элементов  $N$  тем выше  $\lambda_c(t)$  и тем ниже ВБР системы, поэтому для системы с последовательным соединением элементов целесообразно:

- a. уменьшать количество элементов;
- b. уменьшать интенсивность отказов каждого элемента;

Интенсивность отказов системы всегда больше интенсивности отказов элемента ( $\lambda_c$ ). Следовательно, система всегда менее надёжна, чем её элемент.

Для нормального режима эксплуатации имеем:

$$\lambda(t)=\text{const}=\lambda_i \quad (49)$$

Если  $\lambda_i=\text{idem}=\lambda_c$ , то

$$\lambda_c=N \lambda_i \quad (49)$$

Из (48) и (49) следует, что если элемент и система в целом работают на режиме нормальной эксплуатации, то т.к.  $\lambda = \frac{1}{T_c}$ , то можно заключить, что для последовательного соединения

$$\lambda_c = \frac{1}{T_c} \quad (50)$$

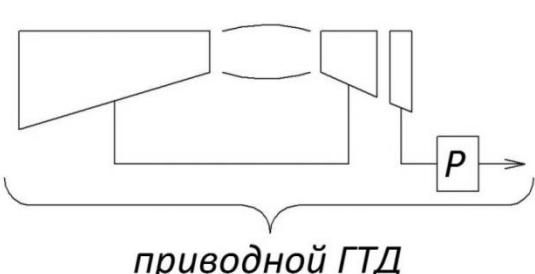
Пример:

Определить наработку до отказа редуктора авиационного конвертируемого ГТД,

если  $T_{1\text{пр}}=15000\text{ч}$ , а потребные значения системы составляют:

- 1)  $T_{1c}=10000\text{ч};$
- 2)  $T_{2c}=12000\text{ч}.$

$$T_{1c} = \frac{1}{\frac{1}{T_{1np}} + \frac{1}{T_{1f}}}; \quad \frac{1}{T_{1c}} = \frac{1}{T_{1np}} + \frac{1}{T_{1f}};$$



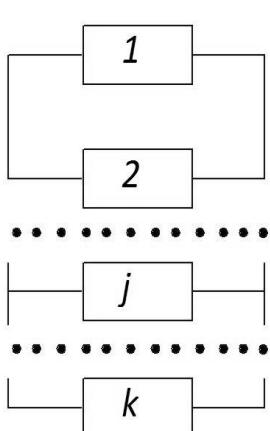
$$\frac{1}{T_{1p}} = \frac{1}{T_{1c}} - \frac{1}{T_{1np}} = \frac{T_{1np}-T_{1c}}{T_{1c} \cdot T_{1np}}; \quad T_{1p} = \frac{T_{1c} \cdot T_{1np}}{T_{1np}-T_{1c}};$$

$$T_{1p} = \frac{15000 \cdot 10000}{15000-10000} = 30000\text{ч};$$



$$T_{1p} = \frac{15000 \cdot 12000}{15000 - 12000} = 60000 \text{ч.}$$

### 2.2.3. Формулы для расчёта показателей безотказности при параллельном соединении элементов



Вероятность отказа системы:

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^k Q_j(t) \quad (51)$$

$$Q_j(t) = 1 - P_j(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_j(t) dt} \quad (52)$$

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^k (1 - e^{-\int_0^t \lambda_j(t) dt}) \quad (52)$$

Пусть все элементы работают на режиме нормальной эксплуатации

$$\lambda_j(t) = \text{const} = \lambda_j \quad (53)$$

Рис.37

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^k [1 - e^{-\lambda_j t}] \quad (54)$$

Если все элементы системы одинаковые, то

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^k (1 - e^{-\lambda_j t}) = (1 - e^{-\lambda_j t})^k \quad (55)$$

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_j t})^k \quad (56)$$

При параллельном соединении надёжность тем выше, чем больше элементов (k).

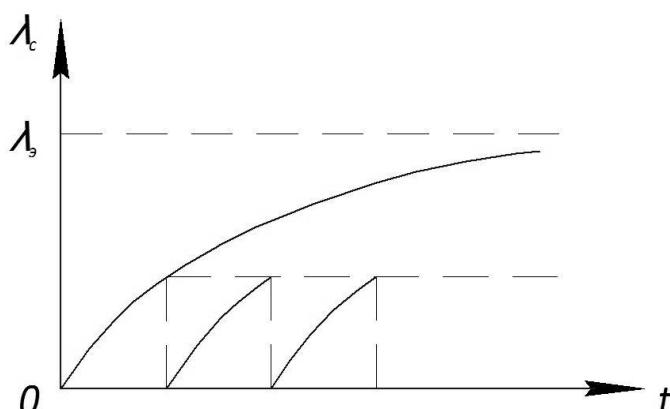
$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = k(1 - e^{-\lambda_j t})^{k-1} \cdot \lambda_j e^{-\lambda_j t} \quad (57)$$

Сравнение уравнений (57) и (30) говорит о том, что плотность распределения не подчиняется экспоненциальному закону, а система с параллельным соединением элементов- режиму нормальной эксплуатации.

$$\lambda_c = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{k\lambda_j(1 - e^{-\lambda_j t})^{k-1} \cdot \lambda_j e^{-\lambda_j t}}{1 - (1 - e^{-\lambda_j t})^k} \quad (58)$$

Вся система также не подчиняется экспоненциальному закону.  $\lambda_c(0) = 0$ ;  $\lambda_c(\infty) = \lambda_j$

Показатели надёжности системы при параллельном соединении всегда лучше, чем показатели надёжности одного элемента.



Из формулы (58) следует, что при  $\lambda=\text{const}$   $\lambda_c$  растет при  $\uparrow t$ .

Постоянное резервирование характерно лишь для небольших интервалов наработки. Если через короткие интервалы времени производится восстановление отказавших элементов, то в каждом



Рис.38

заданном интервале преимущества резервирования будут использоваться наиболее полно.

Докажем что при  $t \rightarrow \infty \quad \lambda_c \rightarrow \lambda_s$ .

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{k\lambda(1 - e^{-\lambda t})^{k-1} \cdot e^{-\lambda t}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^k} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{k\lambda(-\lambda)e^{-\lambda t}(1 - e^{-\lambda t})^{k-1} + k\lambda(k-1)(1 - e^{-\lambda t})^{k-2} \cdot \lambda e^{-\lambda t} \cdot e^{-\lambda t}}{-k(1 - e^{-\lambda t})^{k-1} \lambda e^{-\lambda t}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{-\lambda + \lambda(k-1)(1 - e^{-\lambda t})^{-1} e^{-\lambda t}}{-1} = \lambda$$

Наработка до отказа системы:

$$T_{1c} = \int_0^\infty P_c(t) dt = \int_0^\infty [1 - (1 - e^{-\lambda t})^k] dt = (1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n}) T_{1s}, \quad (59)$$

Для двух элементов:

$$T_{1c} = \int_0^\infty [1 - (1 - e^{-\lambda t})^2] dt = \int_0^\infty [1 - (1 - 2e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t})^2] dt = \int_0^\infty (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) dt =$$

$$= \int_0^\infty e^{-\lambda t} (2 - e^{-\lambda t}) dt = \frac{1}{\lambda} \int_0^\infty (2 - e^{-\lambda t}) d(2 - e^{-\lambda t}) = \frac{1}{2\lambda} (2 - e^{-\lambda t})^2 \Big|_0^\infty = \frac{1}{2\lambda} (4 - 1) = \frac{3}{2\lambda} = \frac{3}{2} T_{1s}, \quad (60)$$

При параллельном соединении элементов наработка до отказа системы повышается, но не пропорционально количеству элементов:

$$K=2 \quad T_{1c} = \frac{3}{2} T_{1s}$$

$$K=3 \quad T_{1c} = \frac{11}{6} T_{1s}$$

Уравнение (58) является теоретическим обоснованием метода эксплуатации по техническому состоянию.

Факт, что показатели надёжности улучшаются при увеличении количества элементов, является основой для метода улучшения надёжности - резервирования.

#### 2.2.4. Резервирование

Резервированием называется метод повышения надёжности системы введением дополнительных элементов или возможностей сверх минимального количества при их абсолютной безотказности.

Элемент, который необходим для выполнения изделия своих функций, называется основным. Элемент, который выполняет функции отказавшего элемента называется резервным.

Резервирование будем классифицировать по следующим признакам:

- I. по возможности одновременной работы всех элементов:
  - ✓ нагруженный резерв;
  - ✓ ненагруженный.



При нагруженном резерве, резервные элементы присоединены к основным в течение всего времени работы и находятся в одинаковом с ними режиме.

При ненагруженном резерве, резервные элементы включаются в работу только при отказе основных.



Рис. 39

II. по способу резервирования элементов:

- ✓ - общее резервирование;
- ✓ - раздельное резервирование.

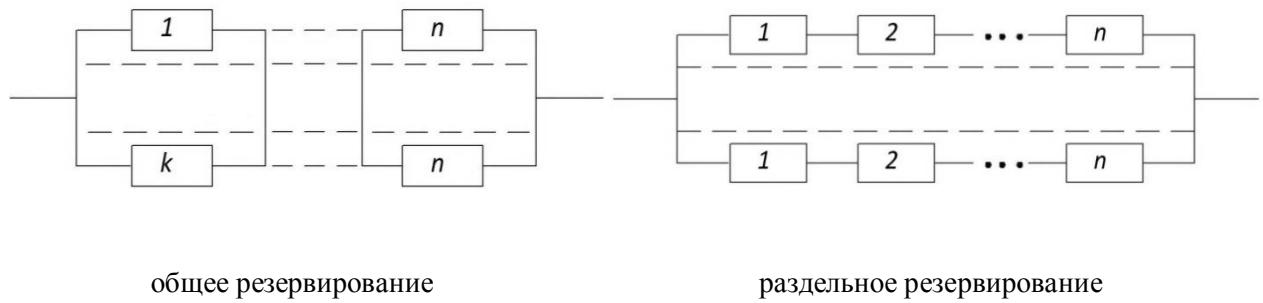


Рис. 40

Рассмотрим две схемы из 4-х элементов.

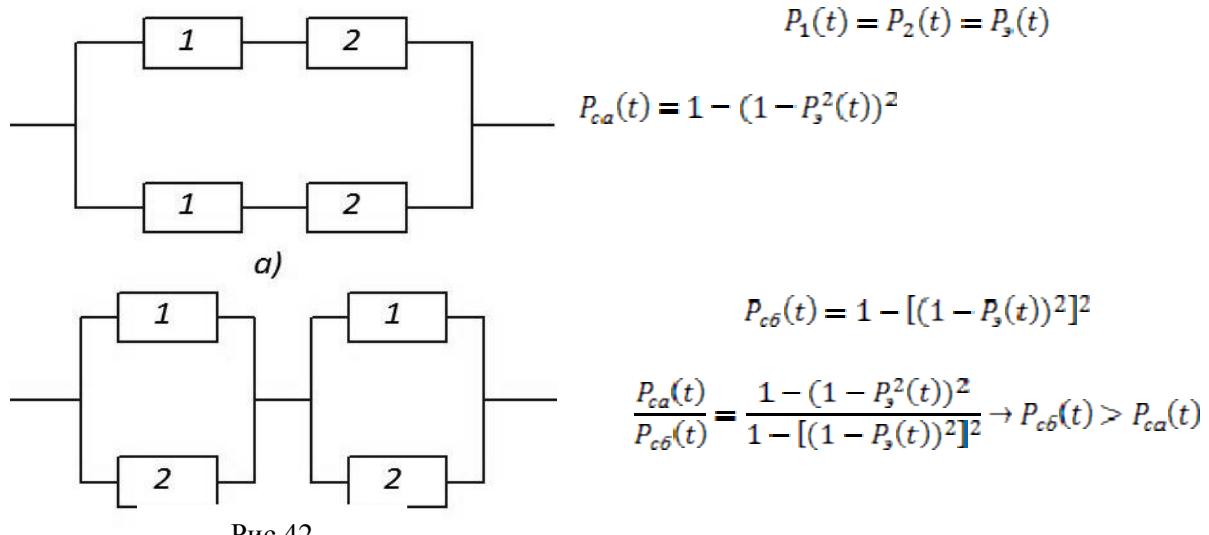
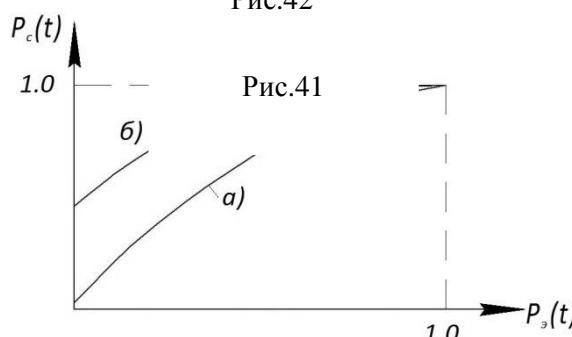


Рис.42



Раздельное резервирование обеспечивает лучшие показатели надёжности.

III. По использованию дополнительных элементов или возможностей:

- ✓ - агрегатное;



- ✓ - нагрузочное;
- ✓ - временное;
- ✓ - функциональное.

Агрегатным называется резервирование, когда для выполнения функции отказавшего элемента используется такой же элемент.

Нагрузочным называется резервирование, при котором оставшиеся работоспособные элементы, обеспечивают работоспособность системы, благодаря переводу на более нагруженный режим (Режим чрезвычайной тяги +10%).

Временное резервирование – резервирование, при котором оставшиеся работоспособными элементы, переводятся в режим более продолжительной работы, чем это предусматривается при безотказности элементов.

Функциональное резервирование – резервирование, при котором функцию отказавшего элемента выполняет элемент, не предназначенный для выполнения этой функции.

### Пример.

Как изменится вероятность безотказной работы на 2-х и 3-х двигательном самолёте, если  $T_1=15000\text{ч}$ ,  $t_n=1,5\text{ч}$  ?

Для режима нормальной эксплуатации:  $P(t)=e^{-\lambda t}$

Если  $\lambda t \ll 0.1$  (т.е.  $P(t) > 0.9$ ), то  $P(t) \cong 1 - \lambda t + \frac{\lambda t^2}{2!} - \frac{\lambda t^3}{3!} + \dots + (-1)^{2k+1} \frac{(\lambda t)^{2k+1}}{(2k)!} (-1)^{2k+1} \frac{\lambda t^k}{k!}$

$$P(t) \approx 1 - \lambda t \quad (61)$$

$$Q(t) = 1 - P(t) = \lambda(t) \quad (62)$$

$$\text{т.к. } \lambda = \frac{1}{T_1}, \text{ то } P(t) = 1 - \frac{t}{T_1} \quad (63)$$

$$Q(t) = \frac{t}{T_1} \quad (64)$$

$$1) \ n=1 \quad Q_1(1.5) = \frac{1.5}{15000} = 0.0001$$

$$2) \ n=2 \quad Q_2(1.5) = \left(\frac{1.5}{15000}\right)^2 = 1 \cdot 10^{-8}$$

$$3) \ n=3 \quad Q_3(1.5) = \left(\frac{1.5}{15000}\right)^3 = 1 \cdot 10^{-12}$$

Резервирование не следует рассматривать как панацею от всех бед по следующим причинам:

- 1) С  $\uparrow$  количества элементов, увеличивается масса двигателя;
- 2) Основной и резервный элементы работают в одних и тех же неблагоприятных условиях;
- 3) Внедрение резервирования приводит к увеличению параметра потока отказов, что усложняет и удорожает систему технического обслуживания и ремонтов.
- 4) Не всякое параллельное соединение является резервированием.

Резервирование применяется в 2-х случаях:

- 1) Когда необходимо создать высоконадёжное изделие из дешёвых и малонадёжных элементов вместо того чтобы создавать высоконадёжное, но дорогие элементы;
- 2) Когда в принципе невозможно получить требуемый уровень надёжности без использования резервирования.

### 2.3. Метод логических схем

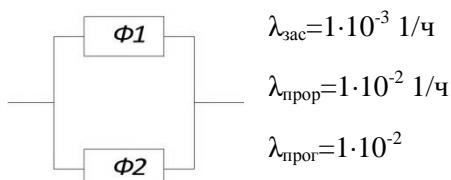
Этот метод применяют если элемент может иметь несколько отказов.

При расчёте показателей надёжности по этому методу вычерчивается принципиальная схема изделия и выявляются возможные отказы, приводящие к потере работоспособности изделия.

Рассмотрим последовательность расчёта на следующем примере.

Пример:

Дано соединение двух фильтров.



Для этой схемы недопустимы прорыв и прогар.

1. Формируем условия безопасности системы.

Система работоспособна, если: или

- a. все элементы работоспособны; или
- b.  $\Phi_1$  работоспособен, а  $\Phi_2$  отказал по засорению; или
- c.  $\Phi_2$  работоспособен, а  $\Phi_1$  отказал по засорению;

Запишем условие безотказности в символах алгебры логики (Буля)

8. Система работоспособна если: или
  - a.  $A_{\Phi_1}$  и  $A_{\Phi_2}$ ; или
  - b.  $A_{\Phi_1}$  и  $A_{\Phi_2^{\text{зас}}}$ ; или
  - c.  $A_{\Phi_1^{\text{зас}}}$  и  $A_{\Phi_2}$ .
2. Строится логическая схема безотказности рассчитываемой схемы:

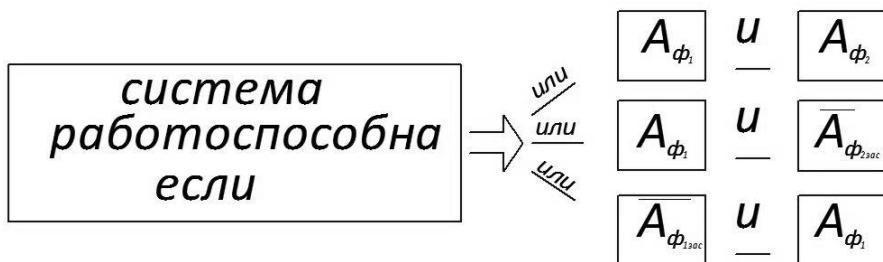


Рис. 43

3. На основании схемы записывается уравнение безотказности:

$$S = A_{\Phi_1} A_{\Phi_2} + A_{\Phi_1} \bar{A}_{\Phi_2^{\text{зас}}} + \bar{A}_{\Phi_1^{\text{зас}}} A_{\Phi_2} \quad (64)$$



4. На основании логического уравнения безотказности составляется алгебраическое уравнение ВБР системы путём замены событий в логическом уравнении вероятностями этих событий.

$$P_c(t) = P_{\phi_1}(t)P_{\phi_2}(t) + P_{\phi_1}(t)Q_{\phi_2^{sac}}(t) + Q_{\phi_1^{sac}}(t)P_{\phi_2}(t) \quad (65)$$

Примем допущения об одинаковости фильтров:

$$P_{\phi_1}(t) = P_{\phi_2}(t) = P_{\phi}(t)$$

$$Q_{\phi_1^{sac}}(t) = Q_{\phi_2^{sac}}(t) = Q_{\phi^{sac}}(t)$$

Тогда:

$$P_{\phi}(t) = 1 - \lambda_{\phi} \cdot t \quad (66)$$

$$Q_{\phi^{sac}}(t) = \lambda_{sac} \cdot t \quad (67)$$

$$Q_{\phi}(t) = (\lambda_{sac} + \lambda_{nprop} + \lambda_{npoz}) \cdot t \quad (68)$$

Предполагается, что  $\lambda = \text{const}$  и не зависит от  $t$ :

$$\lambda_{\phi} = \lambda_{sac} + \lambda_{nprop} + \lambda_{npoz} \quad (69)$$

5. В алгебраическом уравнении (65), соответствующие вероятности заменили выражениями 66-69:

$$P_c(t) = [1 - (\lambda_{sac} + \lambda_{nprop} + \lambda_{npoz})t + 2\lambda_{sac} \cdot t] \cdot (1 - (\lambda_{sac} + \lambda_{nprop} + \lambda_{npoz})t).$$

6. По справочной литературе при данной наработке определяется ВБР системы. Если  $P_c(t) < P_{c\text{ треб}}(t)$ , то необходимо или перепроектировать систему, или применять элементы повышения надёжности.

Если  $P_c(t) \geq P_{c\text{ треб}}(t)$ , то расчёт заканчивается.

### Прочностная надёжность ДЛА

70% отказов опытных двигателей – это прочностные отказы.

Деталь сохраняет работоспособное состояние, если:

1.  $\sigma_{\text{действ}} < \sigma_{\text{пред}}$   
 $\sigma_{\text{действ}} < \sigma_{0,2}$   
 $\sigma_{\text{действ}} < \sigma_{B\tau}^T$
2.  $P_{\text{действ}} < P_{\text{пред}}$
3.  $\sigma_{v\text{действ}} < \sigma_{-1}$
4. Величина изнашивания, коррозии, эрозии  
 $\square < \square_{\text{пред}}$
5. Величина удлинения  $\Delta l < \Delta l_{\text{пред}}$ .

Под прочностной надёжностью будем понимать отсутствие прочностных отказов.

Прочностной отказ может иметь место вследствие:

- 1) Физического разрушения;
- 2) Чрезмерного удлинения;
- 3) Изнашивания, увеличение зазоров в соединениях;
- 4) Увеличении шероховатости за счёт эрозии.

Из прочностных отказов – 60% имеют вибрационную природу.

«Надёжность закладывается при проектировании, обеспечивается в процессе производства, достигается в процессе испытаний и доводки и реализуется в эксплуатации». Н.Д. Кузнецов.

Если работы на устранение прочностного дефекта при конструировании обозначить за «1», то в серийном производстве будет «10», а при эксплуатации «100» и даже «1000».

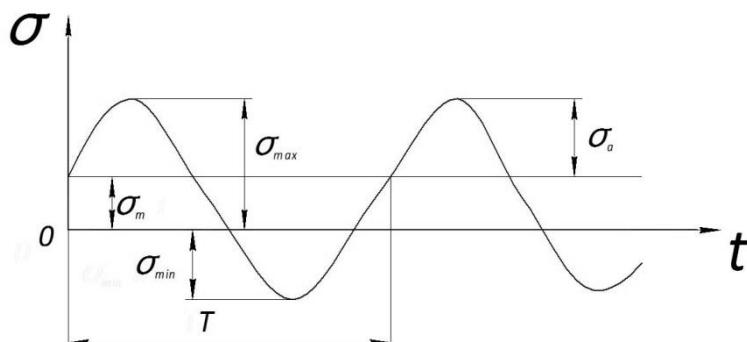
### Надёжность и усталостная прочность

#### Особенности усталостного разрушения

Усталостное разрушение возникает в результате постепенного развития начальной трещины. Для усталостных изломов характерно наличие двух зон: зоны возникновения и развития трещины и зоны окончательного статического разрушения. Поверхность усталостной зоны излома имеет гладкие притёртые участки. В зоне усталостной трещины пластические деформации не наблюдаются. Поверхность статического разрушения обладает зернистой, кристаллической структурой, имеет следы пластической деформации.

При высокой температуре усталостная трещина пересекает зёरна материала, тогда как статическое разрушение идёт по границам зёрен. Зарождение усталостной трещины начинается в области наибольших переменных напряжений (в местах концентрации).

#### Постоянные и переменные напряжения.



Напряжения, действующие в детали, можно представить при стационарном нагружении в виде:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \phi(t)$$

$\sigma_m$  – среднее напряжение;

$\sigma_a$  – амплитуда переменных напряжений

$$\phi(t) = \sin \omega t, \text{ где } \omega = 2\pi f - \text{угловая}$$

частота колебаний, рад/с;

$f = 1/T$  – частота цикла, Гц;

$T$  – период цикла, с.

Если  $\sigma_m = 0$ , то цикл называется симметричным. В общем случае асимметрия характеризуется коэффициентом  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

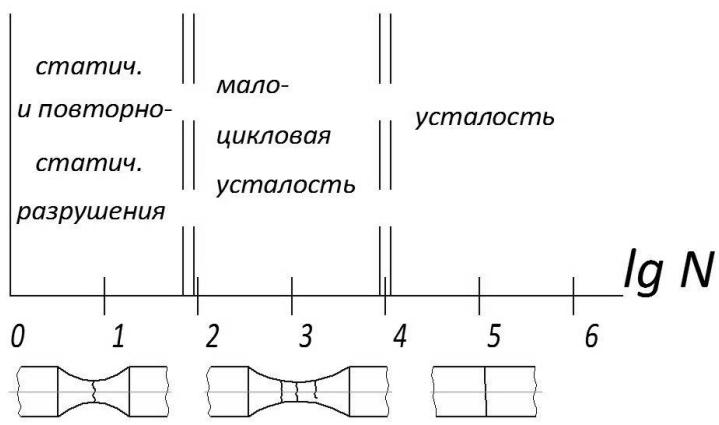
Для симметричного цикла  $R = -1$

Различают кроме того, знакопеременные, знакопостоянные и отнулевые циклы.

Форма цикла, т.е. вид функции  $\phi(t)$ , не оказывает существенного влияния на процесс усталостного разрушения.

## Связь величины разрушающего напряжения и числа циклов.

Экспериментальные исследования показали, что характер разрушения конструкционных материалов зависит от числа циклов нагружений.



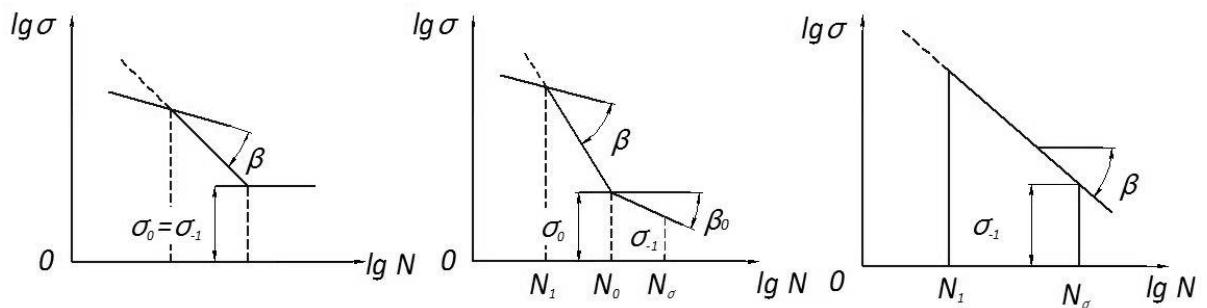
При малом числе циклов в образце из пластичных материалов образуется шейка и разрыв происходит по минимальному сечению, т.е. происходит статическое разрушение.

При числе циклов  $10^2 \dots 10^4$  возникает сетка трещин и менее выраженные пластические деформации наступает разрушение от малоциклической усталости. Оно имеет смешанный

характер, в изломе наблюдаются отдельные участки усталостного разрушения. Разрушение от малоциклической усталости возникает при действии значительных циклических упругопластических деформаций. Частота действия нагрузок невелика. Она определяется частотой запусков двигателя или реверсивных изменениям режимов его работы. При большой длительности работы накапливается число циклов, достаточное для разрушения.

При числе циклов  $N > 10^4$  появляется типичное усталостное разрушение без заметных следов пластической деформации.

При увеличении числа циклов напряжения разрушения уменьшаются. Существует 3 типичных



зависимости  $\sigma_a = f(N)$  для усталостных разрушений.

Углеродистые  
стали

высоколегированные стали  
и титан

жаропрочные сплавы  
и лёгкие цветные металлы

$$N_1 \approx 10^3 \dots 10^4, N_0 \approx 10^6 \dots 10^7$$

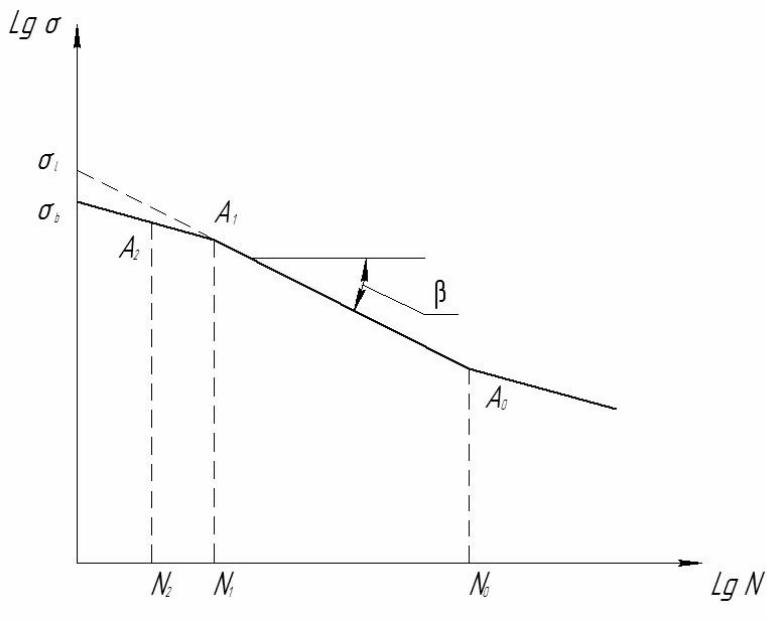
При числе циклов  $N < N_1$  кривые имеют один перелом, связанный с переходом в область малоциклической усталости.

Если при  $N > N_0$  кривая идёт горизонтально, то материал обладает пределом выносливости  $\sigma_{-1}$ , и при  $\sigma < \sigma_{-1}$  усталостное разрушение не возникает.

В других случаях вводится условный предел выносливости для определения числа циклов  $N\sigma$  – базы испытаний. Обычно  $N\sigma = 2 \cdot 10^6 \dots 5 \cdot 10^7$

## Аналитическое описание кривой усталости

Простая и достаточно точная зависимость между  $\sigma$  и  $N$  принимается в виде



$$\sigma^m N = C$$

Где  $m$  – постоянные, зависящие от свойств материала и температуры.

В

диаграмме  $N_1 \leq N \leq N_0$  уравнение можно переписать в логарифмических координатах:

$$Lg \sigma = -\frac{1}{m} Lg N + \frac{1}{m} Lg C.$$

$\operatorname{tg} \beta$  по абсолютной величине равен  $\frac{1}{m}$ . При увеличении

наклон уменьшается и при  $m \rightarrow \infty$  прямая становится горизонтальной. Обычно  $m = 4 \dots 20$ , а для деталей с концентрацией напряжений  $m = 4 \dots 6$ .

Точка перелома  $A_0$  принадлежит кривой  $A_0 A_1$ , поэтому  $C = \sigma_0^m N_0$

Возможно, также следующее описание кривой:

$$\left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m = \frac{N_0}{N}$$

Если продолжить прямую  $A_1 A_0$  до пересечения с осью ординат, то получится предельное сопротивление  $\sigma_l$  которое не совпадает с пределом статической прочности  $\sigma_b$ .

При  $N = 1$

$$\sigma_l = \sigma_0 \sqrt[m]{N_0}$$

В точке перелома  $A_0$  величина  $\sigma_0$  равна условному пределу выносливости  $\sigma_{-1}$  при  $N_0 = 10^7$  циклов:

$$\sigma_l = \sigma_0 \cdot 10^{\frac{1}{m}} = \sigma_{-1} \cdot 10^{\frac{1}{m}}$$

Величину  $\sigma_l$  можно рассматривать как константу материала, характеризующую предельное сопротивление повторному нагружению при условиях, когда развитие макроскопических пластических деформаций затруднено.

При числе циклов  $N \geq N_0$  также справедлива линейная зависимость:

$$\sigma^{m_0} N = C_0$$

Причем  $m_0$  значительно больше  $m$  ( $m_0 \approx m$ ). Тогда  $A_0$  одновременно принадлежит обоим прямым, поэтому:

$$C_0 = \sigma_0^{m_0} N_0 = C \sigma_0^{m_0 - m}$$

В области малоцикловой усталости и повторного статического разрушения удовлетворительное описание можно получить с помощью двух прямых.

Точка перелома  $A_2$  соответствует переходу от малоцикловой усталости к статическому разрушению. Обычно  $N_2 \approx (0.5 \dots 5) 10^2$  циклов. При  $N = 1$  следует принять амплитудное отклонение, равное пределу прочности  $\sigma_b$ .

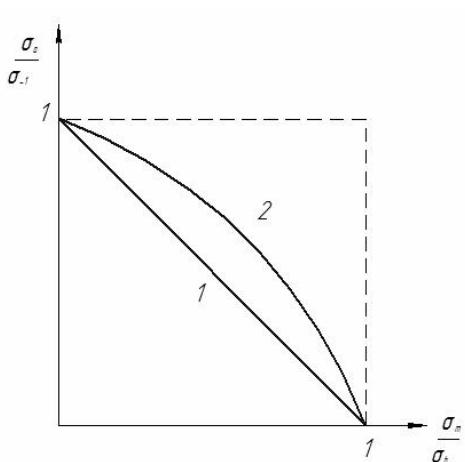
### Влияние некоторых факторов на сопротивление усталости.

Рассмотрим влияние статического напряжения, концентрации напряжений, масштабного фактора и качества поверхности на предел выносливости.

С увеличением напряжения растяжения  $\sigma_m$  от постоянно действующей (статической) нагрузки величина  $\sigma_{-1}$  уменьшается. Наиболее простое описание можно получить, предполагая линейную зависимость между величинами  $\sigma_a$  и  $\sigma_m$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \quad (1)$$

Это уравнение пригодно для титановых и алюминиевых сплавов, высокопрочных сталей. Если учитывается величина температуры, то вместо  $\sigma_b$  можно использовать  $\sigma_{B\tau}^t$

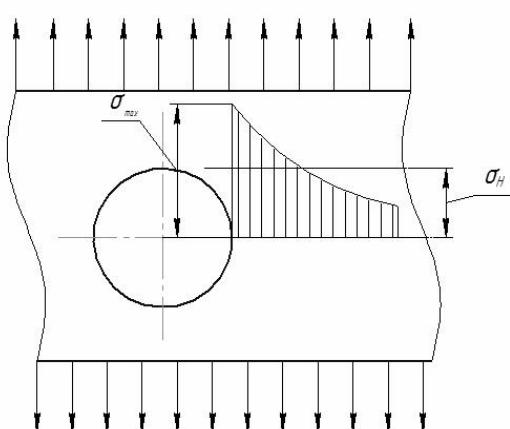


Для углеродистых и легированных сталей удовлетворительные результаты дает зависимость:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b}} \quad (2)$$

Установлено, что при постоянных сжимающих напряжениях предел выносливости повышается, т.к. затрудняется зарождение и развитие усталостных трещин. Поэтому целесообразно создавать остаточные сжимающие напряжения в поверхностных слоях, благодаря упрочняющей обработке.

Влияние концентраций напряжений на  $\sigma_{-1}$  переменных напряжениях существенно больше, чем при постоянных, т.к. усталость (в отличие от статической прочности) имеет разно выраженный локальный характер. Усталостные разрушения начинаются мест концентрации напряжений.

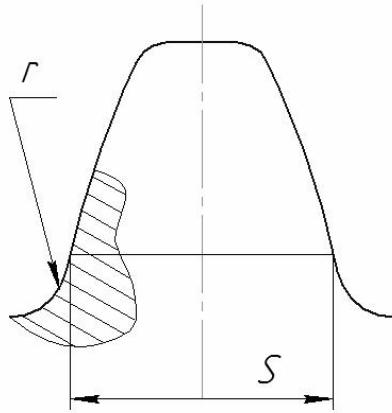


В упругой области наибольшее напряжение представляют в виде:

$$\sigma_{max} = \alpha_\sigma \sigma_H$$

$\alpha_\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$\sigma_H$  - номинальное напряжение определяемое без учета концентрации. Для малых отверстий  $\alpha_\sigma = 3$ .



Коэффициент концентрации возле основания зуба шестерни:

$$\alpha_\sigma \approx 1 + 1.15 \frac{S}{r}$$

При  $r \rightarrow 0$  значение  $\alpha_\sigma \rightarrow \infty$ . При наличии пластических деформаций распределение напряжений выравнивается и величина  $\alpha_\sigma$  уменьшается. Усталостные разрушения при наличии концентрации происходят при условии:

$$\sigma_{a\ max} = K_\sigma \sigma_H = \sigma_{-1}$$

где  $K_\sigma$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений

$\sigma_{a\ max}$  – max переменное напряжение в опасной зоне.

Величина  $K_\sigma < \alpha_\sigma$  и только для деталей больших размеров, изготовленных из материалов, чувствительности и концентрации напряжений, (сталь, титан)  $K_\sigma \approx \alpha_\sigma$ .

В практических расчетах используется формула

$$K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1),$$

где коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений принимается в пределах  $q = 0,5 \dots 0,9$  (нижние значения для малоуглеродистых сталей, верхние – для легированных сталей и титана). При  $q = 0$   $K_\sigma = 1$  и материал не чувствителен к концентрации напряжений: при  $q = 1$   $K_\sigma = \alpha_\sigma$  и чувствительность материала к концентрации напряжений наибольшая.

Масштабный фактор характеризуется размерами детали. С увеличением абсолютных размеров сопротивление деталей усталости уменьшается.

Объяснение эффекта дается с помощью статистической теории усталости. Обычно в статистической теории рассматривается совокупность зерен металла, обладающих различными пределами выносливости. При увеличении размеров возрастает вероятность попадания дефектных зерен в зону концентрации. Проявлению масштабного фактора способствует меньшая однородность материала, трудность обеспечения стабильности технологического процесса, условий контроля.

Масштабный эффект зависит в основном, от поперечных размеров детали, и в меньшей степени от ее длины.

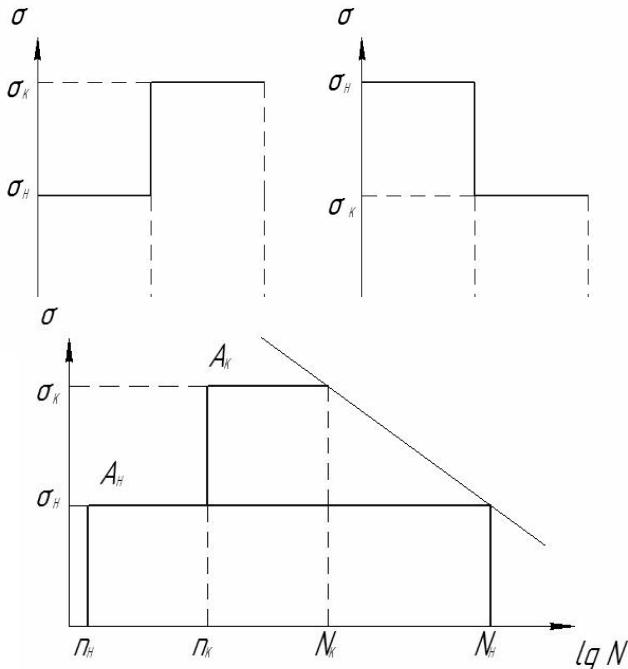
Во многих случаях в опасных точках деталей машин имеет место сложное напряженное состояние (одновременное действие нормальных и касательных напряжений).

Ответственным за усталостные разрушения является максимальное касательное напряжение. При изгибе и кручении вала

$$\tau_{a \max} = \sqrt{\sigma_a^2 + 4\tau_a^2}$$

Качество поверхности существенным образом влияет на сопротивление усталости. Наличие рисок, забоин, грубой обработки может снизить предел выносливости на 10...50%. Ответственные детали, работающие при переменных нагрузках, изготавливают с высокой чистотой поверхности и часто подвергаются упрочняющей обработке. Нестабильность качества поверхности создает одну из важных причин статистического разброса пределов выносливости.

### Суммирование повреждений



Для оценки надежности машин важно учитывать весь спектр нагружения. Во время эксплуатации на детали действуют различные напряжения переменной величины и продолжительности. Требуется определить степень повреждения, внесенную в результат суммарного воздействия. Наиболее правильные оценки можно получить при программном нагружении отражающим эксплуатационную нагрузку. Это составляет основную задачу теории суммирования напряжений.

### Простейшее програмное нагружение и кривые повреждаемости

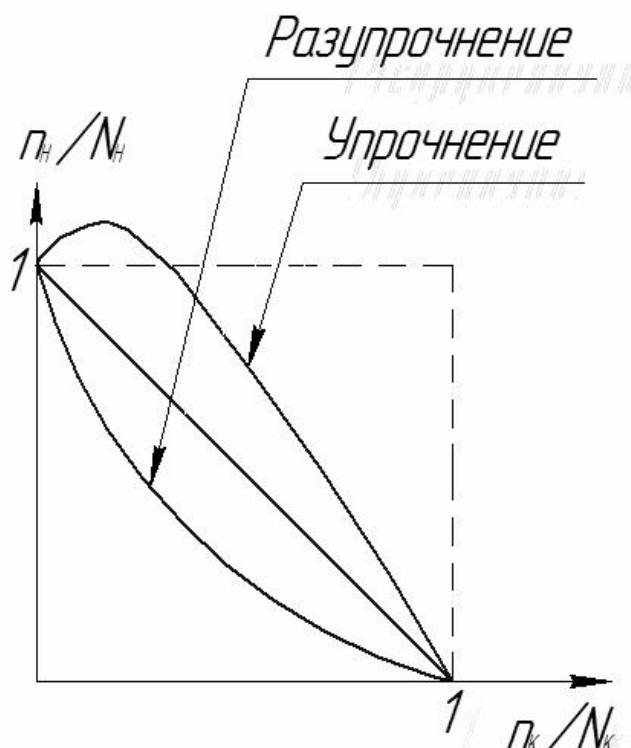
Рассмотрим двухступенчатые нагрузления, при котором деталь получает начальное число циклов  $n_H$  с напряжением  $\sigma_H$  и конечное число циклов  $n_K$  при напряжении  $\sigma_K$ .

Если испытывать деталь при постоянном уровне напряжений, то число циклов до разрушения будет соответственно  $N_H$  и  $N_K$ .

Результаты эксперимента при двухступенчатом нагружении выражают обычно в виде кривых повреждаемости. Прямая линия соответствует условию

$$\frac{n_H}{N_H} + \frac{n_K}{N_K} = 1$$

Это условие, называется условием линейного суммирования усталостных повреждений. Например, если при  $\sigma_H = 500$  Мпа образец разрушается при  $N_H = 1,5 \cdot 10^5$  и



работает  $n_H = 9 \cdot 10^4$  циклов, то проводится “долом” при уровне  $\sigma_K = 600 \text{ Mpa}$  за  $N_K = 5 \cdot 10^4$  циклов, получим число циклов разрушения

$$n_K = N_K \left( 1 - \frac{n_H}{N_H} \right) = 5 \cdot 10^4 \left( 1 - \frac{9 \cdot 10^4}{1,5 \cdot 10^5} \right) = 2 \cdot 10^4 \text{ циклов.}$$

Кривые повреждаемости, расположенные выше кривой линейного суммирования, указывают на процесс упрочнения, а расположенные ниже на процесс разупрочнения тогда как при  $\sigma_K > \sigma_H$  – процесс упрочнения (тренировка).

### Линейный закон суммирования повреждений.

Будем характеризовать повреждения некоторой функцией  $D$ , считая, что моменту разрушения соответствует ее значение  $D = D_p$ , где  $D_p$  – предельное значение функции разрушения.

Предположим, что скорость накопления повреждений по числу циклов является степенной функцией действующего напряжения

$$\frac{dD}{dn} = C_p \sigma^m (n), \quad (1)$$

где  $C_p$  и  $m$  – константы материала.

$$D = C_p \int_0^n \sigma^m (n) dn, \quad (2)$$

Принимаем стационарный режим  $\sigma(n) = \sigma = const$  и обозначает число циклов до разрушения –  $N$

$$D_p = C_p \int_0^N \sigma^m dn = C_p \sigma^m N,$$

Отсюда

$$\sigma^m N = \frac{D_p}{C_p} = C = const \quad (3)$$

Величину  $m$  можно считать равной показателю степени при аппроксимации результатов усталостных испытаний.

$$\sigma^m = \frac{C}{N}, \quad (4)$$

где  $N = N(\sigma)$  – число циклов до разрушения, соответствующих напряжению  $\sigma$ .

Подставляя (4) в (2), получим:

$$D = C_p C \int_0^n \frac{d_n}{N[\sigma(n)]}$$

$N$  – определяется действующим напряжением  $\sigma$ , изменяющимся при увеличении числа циклов.

Пусть  $N_{\Sigma}$  – суммарное число циклов до разрушения при программном нагружении. В момент разрушения

$$D_p = C_p C \int_0^{N_{\Sigma}} \frac{d_n}{N[\sigma(n)]}$$

Подставляется  $C = D_p/C_p b p$  (3), получим

$$\int_0^{N_{\Sigma}} \frac{d_n}{N[\sigma(n)]} = 1 \quad (5)$$

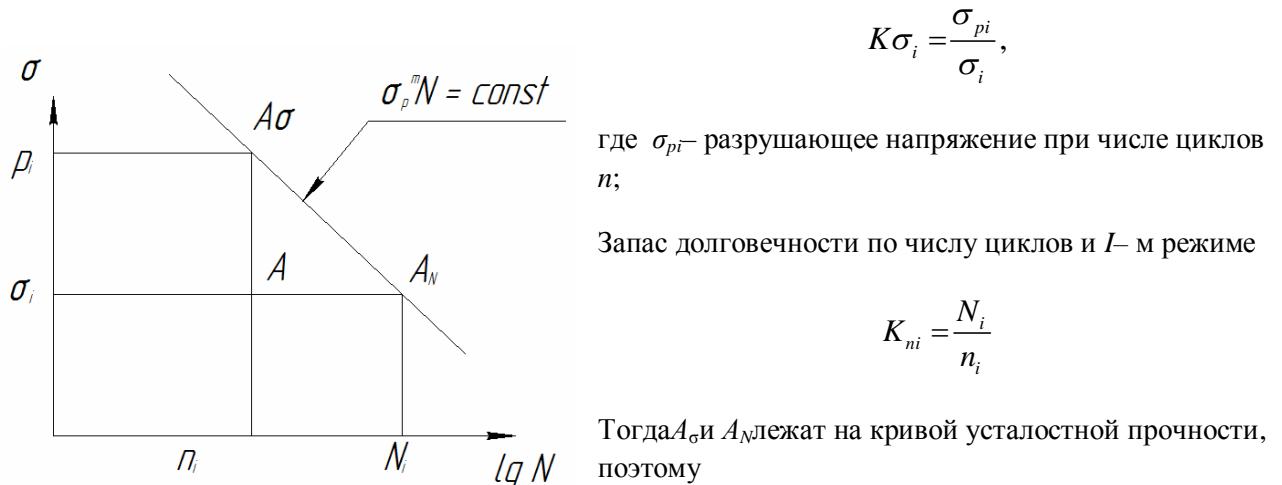
Это условие выражает закон линейного суммирования.

Часто имеет место ступенчатое изменение действующих напряжений, или непрерывное распределение удобно представить в виде ступенчатого. Пусть напряжение  $\sigma_i$  действовало  $n_i$  циклов и всего имелось  $N$  циклов напряжений. Тогда

$$\sum_{i=1}^v \frac{n_i}{N(\sigma_i)} = 1.$$

В такой форме условие линейного суммирования находит широкое применение.

При работе детали на I-м режиме частный запас прочности:



$$\sigma_{pi}^m n_i = \sigma_i^m N_i$$

следовательно запас долговечности

$$K_{ni} = \left( \frac{\sigma_{pi}}{\sigma_i} \right)^m = K_{\sigma i}^m$$

Т.к.  $m \geq 1$ , то запас долговечности значительно больше запаса прочности. Увеличение запаса прочности по напряжениям дает существенное возрастание долговечности, т.к.

$$\Delta K_{ni} = m \Delta K \sigma_i$$

Условие разрушения можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^v \frac{1}{K_{\sigma i}^m} = 1$$

### Обобщение линейного закона суммирования повреждений

Дальнейшее обобщение условий линейного суммирования повреждений содержится в условии усталостного разрушения:

$$\sum_{i=1}^v \frac{n_i}{N_i(\sigma_i)} = a ,$$

где параметр  $a$  зависит не только от материала, температуры, срёды, но и должен отражать историю нагружений.

Учесть все факторы затруднительно и в расчетах применяется значение  $a$  по результатам сходных испытаний. Влияние даже значительных отклонений на величину  $a$  общий закон прочности не велико. Общее условие усталостного разрушения можно выразить в форме.

$$\sum_{i=1}^v \mu_i \left[ \frac{n_i}{N_i(\sigma_i)} \right]^{\rho_i} = a ,$$

Значит  $\mu_i$  для некоторых режимов может быть отрицательным, что дает возможность учесть "тренировку".

Условия суммирования усталостных напряжений для ассиметричных циклов можно принять

$$\sum_{i=1}^v \frac{n_i}{N_i(\sigma_{i\text{экв}})} = 1 ,$$

где  $\sigma_{i\text{экв}}$  – эквивалентное напряжение для  $i$ -го цикла.

$$\sigma_{i\text{экв}} = \sigma_{ai} \left( 1 - \frac{\sigma_{mi}}{\sigma_{bi}} \right)$$

где  $\sigma_{bi}$  – предел статической прочности материала для условий  $i$ -го режима.

Принцип использования эквивалентных напряжений в условиях линейного суммирования может быть распространен на сложное напряженное состояние. При действии  $\sigma_a$  и  $\tau_a$  эквивалентных напряжений по Мизесу равно:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2}$$

При сложном напряженном цикле и ассиметричном циклах можно принимать:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\left[ \sigma_a \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right) \right]^2 + 3 \left[ \tau_a \left( 1 - \frac{\tau_m}{\tau_b} \right) \right]^2}$$

## Запасы прочности

Необходимый уровень прочностной надежности деталей двигателей достигается с помощью выбора надлежащих запасов прочности.

Прочностная надежность деталей иногда оценивается сопоставлением наибольших напряжений в опасной точке с допускаемыми.

$$\sigma_{max} \leq [\sigma]$$

Но величина  $[\sigma]$  не дает представления о надежности в явном виде, т.к. для этого надо знать предельные напряжения, которые вызывают разрушения детали. Величина  $[\sigma]$  носит условный характер, т.к. она не отражает типа разрушения и режима разрушения, сильно зависит от геометрии детали, концентрации напряжений, материала и технологии изготовления.

Поэтому наибольшее распространение получило условие прочностной надежности по запасам прочности

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{pred}}{\sigma_{max}} \geq K_{min}$$

$K_{min}$  – минимальное допускаемое нормами прочности значение запаса прочности.

$$K_{min} = \frac{\sigma_{pred}}{[\sigma]}$$

Практика показала, что значение  $K_{min}$  стабильно для данной детали, тогда как  $\sigma_{pred}$  и  $[\sigma]$  существенно зависят от применяемого материала, геометрии, качества заготовки и обработки, усилий нагружения.

При действии нормальных температур статическая прочность обычных конструкционных материалов (стали, титана, легких алюминиевых сплавов) поэтому в качестве  $\sigma_{pred}$  принимают  $\sigma_e$ .

При воздействии высоких температур на горячие детали в течении длительного времени прочность материала падает и разрушающее напряжение принимается равным пределу длительной прочности

$$\sigma_{B,\tau}^t = \sigma_{gn}$$

Надежная работа деталей горячей части двигателя обусловлена возможностью деформации при отсутствии касания роторных деталей о статор (например). В этом случае используется предел ползучести  $\sigma_{(\varepsilon/\tau)}^t$ , определяемый напряжением, которое вызывает величину остаточной деформации  $\varepsilon\%$  за установленный ресурс  $\tau$  при температуре  $t$  наряду с запасом прочности по напряжениям используют и другие запасы прочности.

- запас по долговечности или числу циклов:

$$K_t = t_{pmin} / t_{max}$$

$$K_N = N_{pmin} / N_{max}$$

$t_{pmin}$  и  $N_{pmin}$  – минимальное значение времени и числа циклов до разрушения.

$t_{max}$  и  $N_{max}$  - максимальная длительность и число циклов нагружения.

- запас по силовому фактору.

$$K_\omega = \omega_{pmin} / \omega_{pmax}, K_T = T_{pmin} / T_{max}$$

$$K_P = P_{pmin} / P_{max}$$

$\omega_{pmin}, P_{pmin}, T_{pmin}$  – минимальные значения приводящих к разрушению параметров нагружения.

$\omega_{pmax}, P_{max}, T_{max}$  - наибольшее значение указанных параметров в рабочих условиях.

- запас усталостной прочности

$$K = \frac{\sigma_{-1N}}{\frac{K_\sigma}{\varepsilon\beta} \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$

где  $\sigma_{-1N}$  – предел выносливости на базе  $N$  циклов;

$\sigma_a$  и  $\sigma_m$  – переменные и постоянные напряжения в опасной точке детали в рабочих условиях.

$K_\sigma$  – коэффициент концентрации напряжений;

$\varepsilon$  – коэффициент масштабного фактора

$\beta$  – коэффициент поверхностных слоев

$\psi_\sigma$  – коэффициент посторонних напряжений ( $\psi_\sigma = 0,1\dots0,3$ )

Если переменные и постоянные напряжения изменяются не пропорционально, то используют понятие запаса по переменным напряжениям:

$$K_g = \frac{\sigma_{-1g} - \psi_{\sigma g} \sigma_m}{K_\sigma}$$

$\sigma_{-1g} = \frac{\varepsilon\beta\sigma_{-1}}{K_\sigma}$  – предел выносливости детали;

$\psi_{\sigma g} = \frac{\varepsilon\beta\psi_\sigma}{K_\sigma}$  - коэффициент посторонних напряжений детали.

Минимальные значения параметров при разгрузении принимаются на основании технологических условий на материал и деталь, справочных сведений и результатов

экспериментов. Наибольшее значение действующего параметра определяется для наиболее тяжелого режима. Условия определения запасов прочности строго оговаривается НТД.

### Вероятность разрушения детали

При рассмотрении условий разрушения обычно составляются две группы параметров.

1.  $\bar{S}$  ( $S_1, S_2, \dots, S_n$ ) - Параметры характеризующие свойства конструкции.
2.  $\bar{R}$  ( $R_1, R_2, \dots, R_m$ ) - Параметры, характеризующие действующие нагрузки и напряжения.

В общем случае  $n \neq m$ .

В каждый момент времени параметры системы  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$  представляют собой случайные числа и поэтому они имеют разбросы. Необходимо знать как величину самих разбросов, так и законы распределения параметров системы. Обычно они распределяются по нормальному или логнормальному закону.

Рассмотрим вариант, когда имеется два определяющих параметра и условие разрушения и условие разрушения можно представить в форме:

$$\varphi = S - R > 0$$

где  $\varphi$  – функция качества.

Если  $\varphi \leq 0$ , то это – условие разрушения детали.

Так как  $S$  и  $R$  имеют разбросы, то их будет иметь и  $\varphi$ . Т.е.  $\varphi$  представляет собой композицию распределения  $S$  и  $R$ . На этом основании можно записать

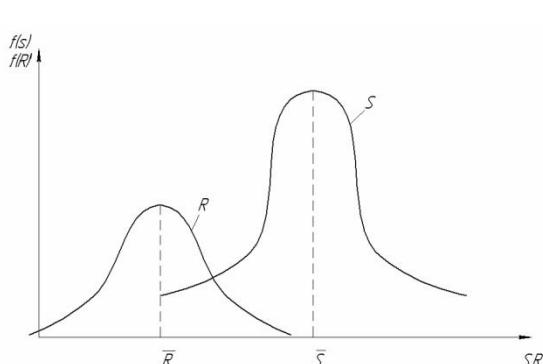
$$\bar{\varphi} = \bar{S} - \bar{R}$$

(“–” – мат. ожидание).

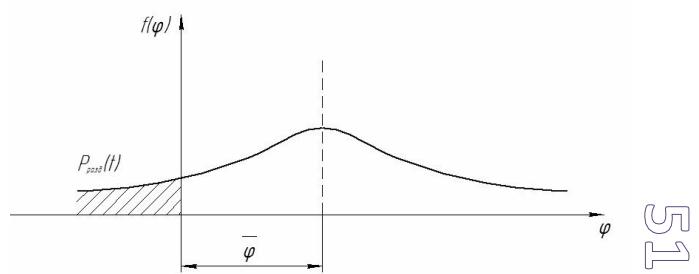
Разность двух нормальных случайных величин также имеет нормальное распределение, значит дисперсия:

$$D_\varphi = D_S + D_R$$

Среднестатистическое отклонение  $\sigma_\varphi = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}$ .



Площадь под кривой есть вероятность разрушения при наработке  $t$ . Т.е. вероятность прочностного



отказа:

вероятность прочностного отказа:

вероятность прочностного отказа:

вероятность прочностного отказа:

$$Q(t) = P_{\text{паз}}(t) = \int_{-\infty}^0 f(\varphi) d\varphi$$

Т.к.  $\varphi$  распределяется по нормальному закону

$$f(\varphi) = \frac{1}{\sigma_\varphi \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varphi - \bar{\varphi})^2}{2\sigma_\varphi^2}}$$

Тогда

$$P_{\text{паз}}(t) = \frac{1}{\sigma_\varphi \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(\varphi - \bar{\varphi})^2}{2\sigma_\varphi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\frac{\bar{\varphi}}{\sigma_\varphi}} e^{-\frac{(u - \bar{\varphi})^2}{2\sigma_\varphi^2}} d\left(\frac{\varphi - \bar{\varphi}}{\sigma_\varphi}\right)$$

Отношение математического ожидания к среднеквадратичному отклонению обозначим  $\gamma = \frac{\bar{\varphi}}{\sigma_\varphi}$  —

коэффициент неоднородности или гауссовская мера надежности.

Коэффициент вариации  $u = \frac{\sigma_\varphi}{\bar{\varphi}}$ .

$$Q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\gamma} e^{-\frac{u^2}{2}} du, \text{ где } u = \frac{\varphi - \bar{\varphi}}{\sigma_\varphi}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\gamma} e^{-\frac{u^2}{2}} du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{u^2}{2}} du + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-\gamma} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

Тогда, используя свойства функции Лапласа, получится:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^X e^{-\frac{u^2}{2}} du = \Phi(x)$$

$$\Phi(0) = 0 \quad \Phi(-x) = -\Phi(x)$$

$$\Phi(x) = 0,5$$

$$Q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\gamma} e^{-\frac{u^2}{2}} du = 0,5 - \Phi(\gamma).$$

Где для двух независимых параметров;

$$\gamma = \frac{\bar{S} - \bar{R}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

распределение по нормальному закону:

Определить вероятность разрушения лопаток, если

$$R = \bar{\sigma}_{\text{деиств}} = 100 \text{ MPa}$$

$$\sigma_R = 20 \text{ MPa}$$

По данным испытаний на выносливость было установлено:

$$\bar{R} = \bar{\sigma}_{-1} = 200 \text{ MPa}$$

$$\sigma_S = 30 \text{ MPa}$$

$$\gamma = \frac{200 - 100}{\sqrt{30^2 + 20^2}} = 2.78$$

$$\Phi(\gamma) = \Phi(2.78) = 0.49728$$

$$Q(t) = P_{\text{разр}}(t) = 0.5 + 0.49728 = 0.27 \cdot 10^{-2}$$

### Связь вероятности разрушения с запасом прочности

Рассмотренная схема статического распределения параметров прочности и действующих напряжений позволяет установить количественную связь между указанными величинами.

Наиболее просто величина  $P_{\text{разр}}$  выражается через запас прочности по средним напряжениям

$$\bar{k} = \frac{\bar{S}}{\bar{R}}$$

Тогда

$$\gamma = \frac{\frac{\bar{S}}{\bar{R}} - 1}{\sqrt{\frac{\sigma_R^2}{\bar{R}^2} + \frac{\sigma_S^2}{\bar{R}^2}}} = \frac{\bar{k} - 1}{\sqrt{\frac{\bar{S}^2}{\bar{R}^2} + \frac{\sigma_S^2}{\bar{S}^2} + u_R^2}} = \frac{\bar{k} - 1}{\sqrt{u_R^2 + u_3^2 \bar{k}^2}}$$

С увеличением  $\bar{k}$   $\gamma$  будет увеличиваться, т.е. вероятность разрушения детали будет уменьшаться.

С увеличением разброса предельных свойств конструкции  $\bar{S}$  и действующих нагрузок  $\bar{R}$   $\gamma$  уменьшается и  $Q(t)$  увеличивается требования к разбросу предельных свойств конструкции

д.б. более жесткими, чем к действующих нагрузок (из-за коэф. k).



### 3. Обеспечение надежности на этапе проектирования

#### 3.1. Особенности ДЛА как класса машин с позиции теории и практики надежностей

Для того, чтобы создавать высоконадежные двигатели надо сначала выяснить те особенности, которыми они обладают.

Особенности обуславливаются: требованиями, условиями проектирования; изготовления, сборки и испытаний; условиями и режимами эксплуатации, а так же особенностями конкретного использования изделия на том или ином объекте.

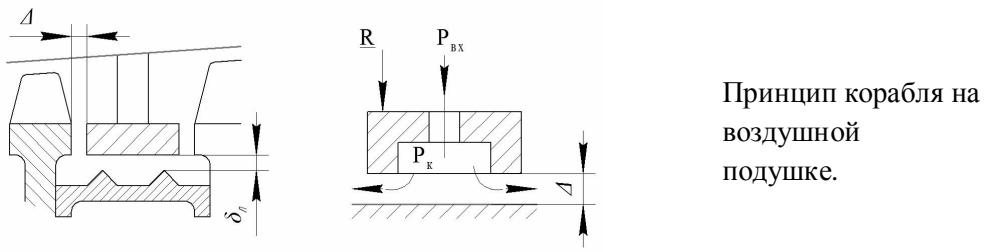
Некоторые особенности присущи не только ДЛА, но в совокупности они представляют особенности только ДЛА.

1. Многообразие и изменчивость причин отказов.
2. Широкий диапазон внешних воздействий и их сильное влияние на надежность.
3. Малый схемный и массовый ресурс.
4. Уникальные конструкции и трудности стандартизации и унификации.
5. Недопустимость некоторых видов отказов в пределах ресурса двигателя.
6. Огромные наработки на некоторые виды отказов.
7. Строго определенное и большое время функционирования АД очень малое время функционирования РД.
8. Статистическая неоднородность парка двигателей.
9. Постоянное совершенствование двигателя.
10. Перенос основных работ по доводке двигателя с этапа доводки опытного изделия на этап серийного изготовления и эксплуатации.
11. Очень редкие случаи возникновения отказов некоторых элементов при небольшом количестве выпускаемых изделий.
12. Многократность действия с обслуживанием и ремонтом АД.
13. Высокое качество двигателей.
14. Высокая наукоемкость двигателестроения.
15. Большое количество разнообразия и противоречивость влияния на параметры двигателя неравнозначности факторов.

##### 3.1.1. Многообразие и изменчивость причин отказов

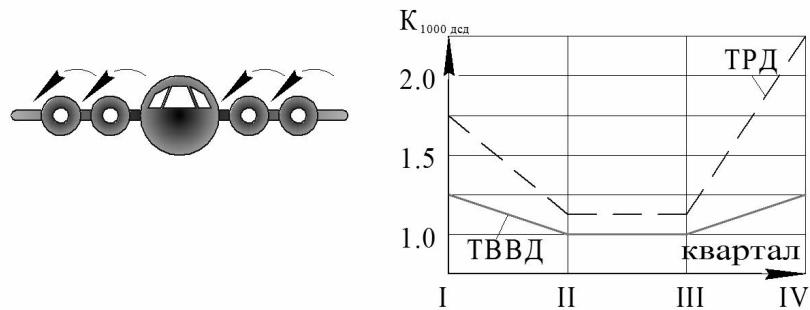
Многообразие отказов обуславливаются следующими факторами:

1. Равнообразием применяемых в двигателе систем (механические, гидравлические, пневматические, газовые, электрические, электронные, электромеханические, электрогидравлические) и использованием эффектов неравногого принципа действия



$$R \uparrow \Rightarrow \Delta \downarrow \Rightarrow V_{ucm} \downarrow \rightarrow P_k \uparrow.$$

2. Огромное количество деталей, физическая природа отказов которых может быть разной (изнашивание, коррозия, ...)
3. Разные режимы работы двигателей.
4. Разные условия эксплуатации двигателей первого типа на одном и том же ЛА, что не равнозначно климатическим условиям.



$$K_{1000_{ДСД}} = \frac{1000}{T_{ДСД}} - \text{количество снятых двигателей на 1000 штук.}$$

5. Неравная ресурсная наработка двигателей, т.е. работа на неравных участках  $\lambda$  - характеристики.
6. Различные периоды освоения двигателя в производстве и эксплуатации.

### 3.1.2. Широкий диапазон внешних воздействий и их сильное влияние на надежность

НК – 12 (ТВД) → Ту – 114 ; Ту – 95 и его 37 модификаций; экраноплан «Орленок».

НК – 8 → Ту – 154; Ил – 62; Ил – 86; экранопланы «Орленок» и «Лунь».

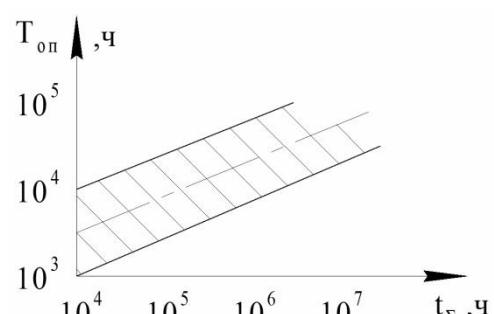
$$T_0 = a_0 \cdot t_{\Sigma}^{a_1} \cdot t_{nol}^{a_2} \cdot r^{-a_3} \quad (109)$$

$t_{\Sigma}$  - суммарная наработка всех самолетов этого типа

$t_{nol}$  - время полета

$r$  - процентная доля работы двигателя на взлетном режиме от общего времени работы ( $r \leq 2\%$ )

$$a_i > 0.$$



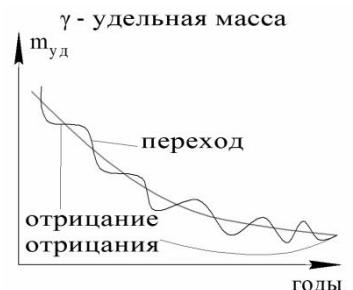
### Следствие из (109):

- Желательно как можно быстрее наработать большее время. При  $\uparrow t_{\Sigma}$  с  $10^4$  до  $10^7$  часов,  $T_{on} \uparrow$  на порядок. Разброс характеризуется  $a_0$  - т.е. конструкторскотехнологическим совершенством двигателя. Этот разброс меньше 10 раз (1 порядок). А суммарная наработка ведет к  $\uparrow T_{on}$  на 2 порядка.  
Значит суммарная наработка всех двигателей оказывает большее влияние на надежность, чем конструкторскотехнологическое совершенство. Т.к. используется опыт других ОКБ.
- Значит нужно делать ЛА – лидеры, которые бы быстрее имели бы побольше наработку для выявления всех недостатков двигателя.
- Требования по надежности должны деференцированы в зависимости от  $t_{полета}$ . Чем выше  $t_{полета}$ , тем показатели безотказности должны быть лучше.
- Желательно  $\downarrow$  долю взлетных режимов в траектории полета ( $r$ ) (раньше  $r$  не более 5%, 3%, 2.5%, 2% - сегодня).

### 3.1.3. Малый схемный и массовый резерв

К ДЛА предъявляется требование: всемерное  $\downarrow m \Rightarrow$  введение резервирования затруднено.

Т.е. резервируем только легкие элементы: датчики пожара, вибрации.



### 3.1.4. Уникальность конструкции и трудности стандартизации и унификации

Каждый новый двигатель создается для решения новых задач, поэтому все конструкторские элементы практически проектируются заново. Но надо создать более эффективную конструкцию, но есть коэффициент унификации:  $K_y = \frac{N_{\partial\_заимствованных}}{N_{dem\_Σ}} \geq 0,5(0,6..0,7)$ , когда двигатель нового поколения  $K_y$  практически нет (но ГоСТовские детали все равно есть).

Значит надо искать специфические пути стандартизации в области двигателестроения.

### 3.1.5. Недопустимость некоторых видов отказов в пределах ресурса двигателя

Недопускается (согласно НЛГС):

- Нелокализованные пожары.
- Нелокализованные разрушения.
- Попадание в салон продуктов «жизнедеятельности» двигателя (паров, топлива, масел ...).
- Самопроизвольное включение отрицательной тяги (флюгирование или реверсирование).
- Невыключение двигателя.

Для проверки: разрабатывают ускоренные методы испытания и создавать уникальное оборудование (разгонные стенды).

### 3.1.6. Огромные наработки на некоторые виды отказов

Например: наработка соединительных муфт валов для всего парка двигателя:  $t_{\Sigma} = 300000$  часов  
 $\Rightarrow$  методы ускоренных испытаний.

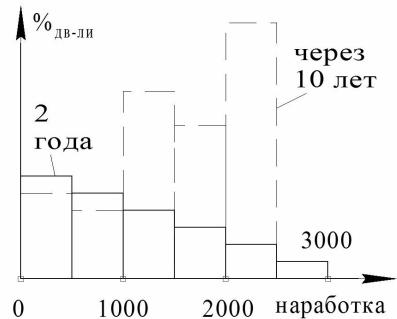
### 3.1.7. Строго определенное и большое время функционирования АД и очень малое время функционирования РД

Но строго регламентированное: на каждом этапе эксплуатации двигателя должно быть достигнуто строго определенное значение ресурса.

### 3.1.8. Статистическая неоднородность парка двигателей

Обусловлена:

1. Двигатель постоянно совершенствуется  $\Rightarrow$  в эксплуатации и базовые, и усовершенствованные двигатели.
2. Эксплуатирующиеся двигатели имеют неравную ресурсную наработку.
3. Двигатели могут выпускаться  $\neq$  заводами.



### 3.1.9. Постоянное совершенствование двигателя

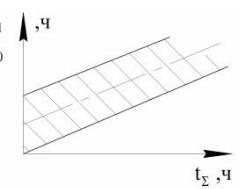
(положительная обратная связь эксплуатации с производством)



И ОКБ и изготовитель вносят изменения в конструкцию после выявления причин отказов. Поэтому  $\rightarrow$  при  $t_{\Sigma}$  (через обратную связь) появляется больше отказов. (А время полета – само влияет).

Конструктор на этапе проектирования должен предусмотреть места, в которые можно будет вносить изменения, направленные на повышение надежности двигателя.

В Англии чертеж детали за жизнь изменяется 5 раз. На этапе доводки в год вносится  $\approx 1000$  изменений (у Н.Д. Кузнецова).



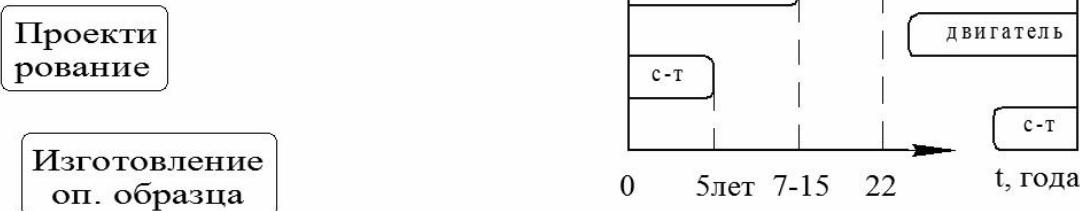
### 3.1.10. Перенос основных работ по доводке двигателя с этапа доводки опытного изделия на этап серийного изготовления и эксплуатации

Т.е. опытный двигатель (не прошедший ГИ) отрабатывается на пониженные параметры, достаточные для начала эксплуатации.

### Старая методология



### Новая методология



Значит, на серийных заводах должны быть развиты и укомплектованы экспертные цехи, лаборатории, станции, обеспеченные научным сопровождением. Т.е. функции инженера в этом случае не подразделяются на конструкторские, технологические и эксплуатационные, а синтезируются.

**3.1.11. Очень редкие случаи возникновения отказов некоторых элементов при небольшом количестве выпускаемых изделий**

1981 г.

НК – 8 – 2У	1820 шт.
НК – 8 – 4	482 шт.

Как в этом случае при ограниченном количестве событий достоверно определить показатели надежности?

Сегодня нет корректных методов оценки показателей надежности единичных случаев.

Сегодня задача – обеспечить абсолютную безотказность каждого отдельного изделия.

**3.1.12. Многократность действия с обслуживанием и ремонтом АД и однократность действия РД**

Естественно стратегия эксплуатации зависит от этой особенности.



Если двигатель ремонтируемый и обслуживаемый, то мы должны разработать методы оценки показателей надежности не только новых двигателей, но и с учетом, что в эксплуатации есть и ремонтные двигатели, у которых остаточный ресурс понижен.

### 3.1.13. Высокое качество двигателей

Эта особенность должна учитываться при влиянии субъективных факторов (связанных с человеком). Т.е. надо разработать методы автоматического контроля обработки результатов испытаний, изготовления и сборки.

### 3.1.14. Высокая наукоемкость двигателестроения

Определяется:

1. Разнообразием и сложной взаимосвязью физико-химических процессов, имеющих совершенно неравнозначную природу.
2. Огромное количество деталей.

У современного двигателя:  $N_{dem} = 10^4 \dots 10^5$  штук.

$$N_{\text{конст-параметры}} = 10^5 \dots 10^7 \quad N_{\text{функци-параметры}} = 10^4 \dots 10^7$$

РАЗМЕРЫ, ТЕХТРЕБОВАНИЯ

	Наименование	Количество деталей
НК – 8 – 2У	563	70947
НК – 8 – 4	5172	61228
НК – 86	5542	56262

3. Большой удельный вес труднообрабатываемых, жаропрочных и жаростойкий деталей.  
1 кг авиационной конструкции стоит 1...3 тыс. \$  
1 кг автомобиля стоит 50\$  
На 1 лопатку – 74 нормо-часов  
На 1 автомобиль – 62 нормо-часа.
4. Динамизм конструкции (т.е. внесение изменений в конструкцию)

### 3.1.15. Большое количество разнообразия и противоречивость влияния на параметры двигателя неравнозначных факторов

1. Для  $\uparrow$  мощности двигателя надо  $\uparrow$  его массу.
2. Для  $\downarrow$  расхода надо усложнить двигатель  $\neq$  системами топливоподачи.

## 3.2. Принципы создания высоконадежных двигателей (ПСНВД)

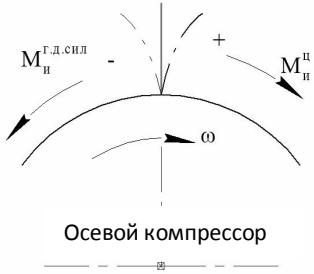
Выявленные особенности ДЛА с позиции теории и практики надежности позволяют наметить пути обеспечения надежности на  $\neq$  этапах ЖЦИ.

Проектирование – это сочетание науки и искусства, поэтому каждый перечень правил, рекомендаций и принципов не может быть окончательным и неизменяемым.

Но учет этих принципов позволяет создавать высоконадежные изделия в кратчайшие сроки.

### 3.2.1. Всесторонний учет условий применения двигателя

Этот принцип реализуется системой расчетных случаев.



Продемонстрируем его на примере рабочей лопатки:

т.к. разность  $P \Rightarrow M_u$ .

При проектировании надо, чтобы  $M_u$  от центробежных сил был направлен в противоположную сторону.

$$1. H = 0; V = 0; t_{u_{\max}}; \omega_{\max}$$

$$(\text{стенд}) \rightarrow M_u^r = M_u^l$$

$$\sigma_{u\Sigma b} = -\sigma_u^r + \sigma_u^l$$

$$\sigma_{u\Sigma c} = \sigma_{u\Sigma a} = \sigma_u^r - \sigma_u^l = 0$$

$$2. H \approx 0(y_{\text{земли}}); V_{\max}; \omega_{\max}; t_{H_{\min}} (\text{зимой}) \rightarrow \rho_{\text{возд}_{\max}}$$

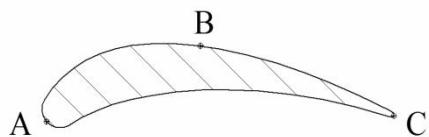
$$M_u^r > M_u^l \Rightarrow \sigma_{u\Sigma c} = \sigma_{u\Sigma a} > 0 \text{ (растянуты } A \text{ и } C)$$

$$\sigma_{u\Sigma b} < 0 \text{ (сжатие).}$$

$$3. H_{\max}; V_{\max} \rightarrow \rho_{H_{\min}}; \omega_{\max}$$

$$M_u^r < M_u^l \Rightarrow \sigma_{u\Sigma c} = \sigma_{u\Sigma a} < 0 \text{ (сжатие)}$$

$$\sigma_{u\Sigma b} > 0 \text{ (растяжение)}$$



Мы рассмотрели 3 расчетных случая.

В некоторых случаях может оказаться, что достичь 100% эффекта очень тяжело. В таких случаях можно оказаться от 1% эффекта, но эксплуатационники должны знать об ограничениях в объеме 1%.

Например: в период массового перелета птиц  $m > 2$  кг полеты запрещены.

### 3.2.2. Всестороннее изучение истории доводки предшествующих двигателей

Сведения по истории доводки содержатся в научно-технических отчетах предприятий, в трудах конференций, в книгах.

Трудности в реализации данного принципа:

1. Как писать эту историю доводки, чтобы она была методическим материалом для последующих поколений?
2. Как использовать историю доводки при создании новых двигателей?
3. Как заинтересовать людей в необходимости написания истории доводки?

### 3.2.3. Обеспечение необходимых запасов работоспособности

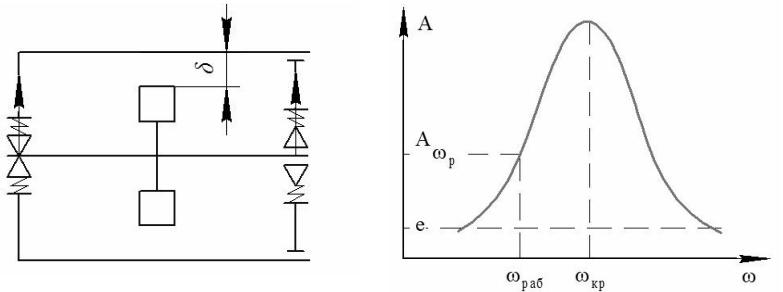
Запасы работоспособности можно разделить на 4 группы:

1. Запасы работоспособности по вибрационному состоянию (критические скорости вращения, вибрационные  $\sigma$ , частоты колебания).
2. Запасы работоспособности по термометрированию (по полям температур в нагретых и переохлажденных деталях).
3. Запасы работоспособности функциональных систем (по маслосистеме ( $t_{\text{ecn}}$ ),  $P$  на входе в двигатель, обработка системы запуска, работоспособность систем дренажа, противообледенительной системы, противопожарной системы, системы аварийной защиты).
4. Запасы работоспособности по эксплуатационным характеристикам (по тяге, по удельному  $G_T$ , по устойчивости работы двигателя, обеспечение работоспособности при 4-х кратном ресурсе, запасы по отбору воздуха, перегрузке ротора, при попадании посторонних предметов и т.д.).

Обеспечение этого принципа возможно только на основе оптимального проектирования, т.е. на основе разрешения противоречий между влияниями неравнозначных параметров.

Критерии работоспособности:

1.  $A_{\omega_{kp}} < \delta$
2.  $\sigma_{uzg.v} > \sigma_{pred}$ .
3.  $R_A < [R]$
4.  $A_{onope} < [\delta_{demph}]$
5.  $\sigma_{korpn._om.Ra} < \sigma_{pred}$ .
6. Невозбуждение корпусных агрегатов.



### 3.2.4. Принцип эквивалентного двигателя (сравнение создаваемого двигателя с прототипами)

В последнее время внедрен метод конструктивной последовательности: при создании нового двигателя используются хорошо апробированные методы расчета, технологии, конструкционные элементы, методы испытаний.

ЖРД: РД – 170:  $P_0 = 840$  тонн силы

РД – последовательная система.  $\lambda_c(t) = \sum \lambda_i(t)$ , а  $\frac{1}{\pi_c} = \sum \frac{1}{\pi_i}$ .

При создании нового двигателя общее количество отказов ↓, но весовая доля каждого двигателя примерно постоянна (с ↑ опыта).

$\alpha_i = \frac{\lambda_i(t)}{\lambda_{\text{obs}}(t)}$  - весовой коэффициент отказа  $i$ -го элемента (110).

$$\alpha_i \approx const, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (111).$$

Пример: надо сдать на ГИ – I двигатель с наработкой до отказа в 500 часов.  $\alpha_i = \frac{T_{1ДЛA}}{T_{li}}$  (112).

Элемент надежности	1	2	3	...	...	9	10
$\alpha_i$	0.05	0.1	...	...	...	0.25	0.08
$T_{li}$ , ч	10000	5000	...	...	...	2000	6250

$$\text{Из 112} \rightarrow T_{li} = \frac{T_{1ДЛA}}{\alpha_i} \quad (113).$$

Этот метод деференцирует наработку до отказа каждого элемента двигателя.

Из 113  $\rightarrow$  чем  $\downarrow \alpha_i$ , тем больше должна быть наработка.

Если  $\underline{\alpha_i < \frac{1}{n}}$  (114), то  $i$ -ый элемент высоконадежный.

Если элементы высоконадежны:  $\alpha_i = \frac{1}{n} = \alpha_s$  (115)

$\alpha_i > \frac{1}{n}$  (116) – низконадежные элементы.

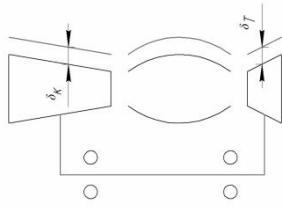
Использование 114, 115, 116 позволяет наметить стратегию доводки. В первую очередь нужно доводить те элементы, у которых  $\alpha_i > \frac{1}{n}$ .

Метод весовых коэффициентов позволяет:

1. Оценивать достигнутый уровень надежности каждого элемента
2. Дифференцировать требования к показателям надежности каждого элемента (было  $\alpha_i = 0.05 \Rightarrow$  следующий компрессор  $\alpha_i = 0.04$ ).
3. Обусловить сложность системы или узла с точки зрения надежности (т.к. 9 – 0.25 - то этот элемент сложный).
4. Планировать работу по достижению требуемого уровня надежности путем перераспределения технических и материальных ресурсов, а также людских резервов.
5. Оценивать уровень квалификации и эффективности работы коллектива.

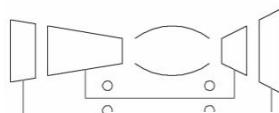
### 3.2.5. Упрощение конструкции и схем

Чем проще конструкция, тем она высоконадежней. А на практике мы усложняем двигатель для повышения надежности.



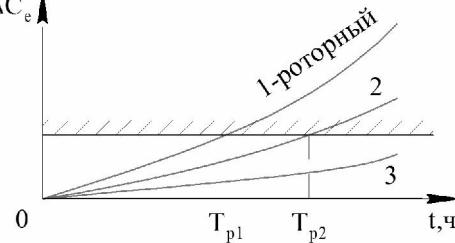
Пример: Для повышения тяги требуется увеличить линейные размеры, т.е.  $\delta_K$  и  $\delta_T$  надо  $\uparrow \rightarrow \eta \downarrow \rightarrow C_{y\vartheta}(C_e) \uparrow \rightarrow$  эффективность  $\downarrow$ .

Появилась идея укоротить двигатель при  $\uparrow$  тяги.



А в одновальном  
оборотах вращения  
помпаж. При переходе к  
имеем выигрыш в длине:  $\Delta l_{12}$ .  
схеме габариты еще меньше:  
массе). Появление двух- и  
привело к обеспечению  
надежности.

Вал ВД – высокие обороты, вал НД – низкие  
обороты.



двигателе при высоких  
оборотах ротора возникает  
двуходильной схеме  
При трехвальной  
 $\Delta l_{23}$ (выигрыш в  
трехвальной схеме  
параметрической

Упрощение конструкции нельзя понимать в обычательском смысле. Упрощение конструкции это:

1. Устранение слабеющего элемента. Т.к.

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) < P_{j \min}(t) \quad (117)$$

Отсюда концепция слабеющего элемента: необходимо в первую очередь улучшать показатели надежности слабеющего элемента.

2. Уменьшение количества элементов  $n$ , повышением эффективности оставшихся элементов.
3. Перевод специальных методов расчета, испытаний, технологий производства, сборки в категорию одинарных, которыми владеют не единицы, а целые коллективы.
4. Использование новых физических эффектов, позволяющих сократить до минимума число агрегатов, имеющих подвижные элементы.
5. Освобождение двигателя от вспомогательных функций. Лучше поставить ВСУ (вспомогательные СУ) для надува салона самолета.
6. Выбор умеренных параметров. Не максимальные, чтобы увеличить надежность.

### 3.2.6. Агрегатирование и панелирование

Агрегатированием называется расположение агрегатов, имеющих одинаковые или близкие функции в виде одного легкосъемного агрегата. Примером является командно - топливный агрегат.

Панелирование – расположение на одной поверхности агрегатов одного функционального назначения с целью сохранения количества разъемов, меньшей длины, трубопроводов и обеспечения легкого доступа и замены агрегатов. Пример: масленая или топливная система.

### 3.2.7. Стандартизация и унификация

Унификация – рациональное сохранение некоторых, видов, типов и размеров изделий одинакового функционального назначения. Законодательное закрепление достижений унификации есть стандартизация.



ГОСТ, ОСТ, СТП, нормы.

При использовании стандартизованных решений легко обеспечивается требования надежности. Но принцип стандартизации встречает сопротивление творческих людей, т.к. способствует созданию идеологии отставания. Для разрешения этого диалектического противоречия надо создавать мощный научно-технический задел.

В двигателестроении сформированы 4 направления стандартизации:

1. Стандартизация элементов (крепеж, трубопроводы, подшипники и т.д. / стандартизация вещей)
2. Стандартизация методов расчетов, испытаний, технологий, требований к двигателям, оценки надежности (стандартизация расчетов).

На **НК – 12**: 2835 болтов. Из них болтов M8 и M10 – 87,5 %.

На **НК – 12СТ**: 4286 болтов (M8, M10 – 90,4 %).

На изделии **ФМ**: 5757 болтов (92 % M8, M10).

На изделии **Е**: 7238 болтов (94%).

Элементы крепежа на двигателе составляют порядка 4-5 % от  $M_{\text{общ}}$ .

На самолете до 12% от массы самого самолета.

Коэффициент унификации:  $(K_y > 0.5)$

$$K_y = \frac{N_{cm} + N_{yu} + N_{покупн} + N_{оригинал}}{N_{\Sigma}} \quad (118)$$

3. Создание двигателей широкой применяемости.
4. Создание базовых элементов: РД – камер; ПД – ЦПГ

### 3.2.8. Ресурсное проектирование

Принцип ресурсного проектирования заключается в том, что теперь на стадии проектирования все элементы рассчитываются на обеспечение требуемого ресурса.

Концепция ресурсного проектирования базируется на следующих положениях:

1. Двигатель – сложная техническая система, в которой показатели технического совершенства однозначно связаны с показателями надежности. Поэтому при проектировании двигателя оптимизируют термогазодинамические параметры и показатели надежности в соответствии с назначенным ресурсом и требуемыми показателями безотказности.

Экономичность

$m_{yo}$

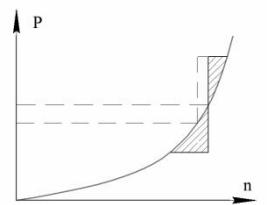
Надежность

Все 3 наилучших – невозможно. Надо выбрать – что самое главное для данного двигателя.

2. При ресурсном проектировании все детали обязательно рассчитываются на долговечность, которая обуславливается длительной прочностью, малоцикловой усталостью и ползучестью.

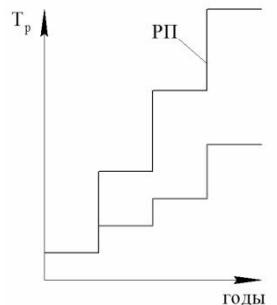


3. Расчет на прозрачность элементов двигателя проводится на полный назначенный ресурс и обязательно предусматривается система диагностики двигателя.
4. При РП, расчет на прочность должен проводиться на основе моделей высочайшего уровня с учетом концентрации напряжения и одновременном воздействии неравных факторов (вибрационных, радиационных, тепловых и т.д.).
5. РП должно быть подсистемой общей САПР двигателя и должно содержать модели не равных уровней для использования на не равных этапах проектирования: техническое предложение, эскизный проект, рабочее проектирование.
6. РП должно охватывать взаимосвязанные этапы проектирования, конструирования и разработки технологии, а также иметь обратную связь с банком данных по доводке двигателя.
7. При РП надо использовать модели долговечности, позволяющие обуславливать время и число циклов до разрушения. Причем, влияние не равных факторов надо рассматривать не в детерминированном виде, а в вероятностной постановке, т.е. с учетом разброса.
8. При РП должны быть разработаны программы ускоренных, эквивалентно-циклических испытаний.
9. При РП обязательно выявляются потенциально слабые места, с целью разработки системы технической диагностики при эксплуатации по техническому состоянию.



#### Положительные стороны РП:

1. При РП в результате всестороннего анализа прочностного состояния, особенно в местах с концентрацией напряжений должна резко возрасти надежность элементов и всего двигателя.
2. Проектирование двигателя на полный ресурс будет способствовать более быстрому, поэтапному его достижению.
3. Использование моделей прочности и динамики высокого уровня в САПР позволяет сократить сроки доводки двигателя.
4. РП должно привести к более широкому использованию научно-технических достижений во всех областях проектирования, прочности, динамики и эксперимента. При этом важно учитывать отечественный и зарубежный опыт.



#### 3.2.9. Резервирование – как принцип создания высоконадежных двигателей

#### 3.2.10. Создание благоприятных условий для работы деталей

1. Создание равномерных полей  $T$  и  $P$ .
2. Ограничение некоторых параметров.
3. Защита элементов от посторонних предметов (фильтры для ФК).
4. Демпфирование колебаний.
5. Устранение концентраций напряжения.
6. Применение ВСУ.
7. Охлаждение высоко нагретых поверхностей и элементов.
8. Смазывание трущихся поверхностей.
9. Резервирование некоторых элементов, систем.
10. Устранение ударных нагрузок.



11. Надежное закрепление деталей.
12. Оптимальное расположение деталей.

### 3.2.11. Ограничение последствий отказов

1. Непробиваемость корпусов.
2. Безопасный отказ.
3. Остановка двигателя при разрушении валопровода.

### 3.2.12. Обеспечение высокой долговечности

1. Металлургическими методами.
2. Конструктивными методами, т.е. переход от точечного контакта к линейному, а лучше к поверхностному.
  - a. В ПД вместо подшипников качения – подшипники скольжения.
  - b. Клапана делают из жаропрочных сталей.
  - c. Вкладыши в шатунах.

### 3.2.13. Обеспечение стабильной и прогрессивной технологий изготовления, не вносящей в конструкцию дополнительной надежности

Пример: рассоединение валов (обработка не тупыми резцами).

### 3.2.14. Обеспечение современного уровня технологичности конструкций

### 3.2.15. Устранение возможных ошибочных сборок, включений и отключений

### 3.2.16. Обеспечение удобства эксплуатации и ремонта, в частности модульности конструкций

### 3.2.17. Обеспечение контроля и самоконтроля

### 3.2.18. Выбор умеренных параметров для обеспечения высоких показателей надежности

### 3.2.19. Широкое использование САПР, автоматизации производства, испытаний и эксплуатации с точки зрения устранения субъективности

## 4. Поддержание надежности двигателей в процессе их эксплуатации

### 4.1. Характеристики процессов обслуживания и ремонта

При условии выполнения очевидного требования соблюдения установленных для данного изделия правил эксплуатации основными факторами, обеспечивающими поддержание надежности изделий в процессе эксплуатации, являются обслуживание и ремонт.

Восстанавливаемые изделия периодически требуют обслуживания, все виды обслуживания можно разделить на плановые и внеплановые.



Плановые – направлены на поддержание изделий в состоянии, обеспечивающем требуемую надежность, а в ряде случаев, например, в авиации – требуемую безопасность.

Внеплановые – нужны для восстановления функций изделия в связи с отказами и неисправностями.

$\tau_e$  - время восстановления.

Предположим, что время простоя равно нулю, т.е. рассматриваем только время работы изделия и время его восстановления.

$\tau_e$  можно считать случайной величиной, поэтому принимаем в качестве случайной характеристики восстанавливаемости изделия вероятность восстановления за время, меньше заданного промежутка  $t_e$ :  $F(t_e) = \text{Bep}\{\tau_e < t_e\}$ , где  $F(t_e)$  – функция распределения времени восстановления.

Обозначим безусловную вероятность окончание восстановлено в интервале времени  $(t_e, t_e + dt_e)$ .

Условная вероятность окончания восстановления в этом интервале:  $P_e$ .

$$dF(t_e) = [1 - F(t_e)] P_e$$

$P_e = \mu(t_e) dt_e$ , где  $\mu(t_e)$  интенсивность восстановления, тогда:  $dF(t_e) = [1 - F(t_e)] \cdot \mu(t_e) dt_e$

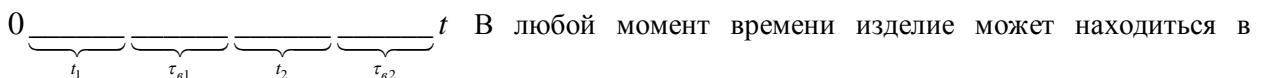
Решение этого уравнения при начальном условии  $F(0) = 0$ .

$$F(t_e) = 1 - e^{-\int_0^{t_e} \mu(t_e) dt_e}.$$

Аналогично среднему времени наработки на отказ  $T$  находится среднее время

$$\text{восстановления: } T_e = \int_0^{\infty} [1 - F(t_e)] dt$$

При условии:  $T_e = \frac{1}{\mu}$



исправном состоянии при следующих возможных событиях:

- ✓ за время  $(0, t)$  изделие не отказывало;
- ✓ изделие отказалось, но было восстановлено.

Вероятность того, что изделие в момент  $t$  работоспособно,  $p_e(t) = P(t) + P_1(t)$ , где

$P(t)$  вероятность безотказной работы изделия за время  $(0, t)$ ,

$P_1(t)$  – вероятность того, что отказавшие в интервале  $(0, t)$  изделие было восстановлено к концу этого интервала.

При  $t \rightarrow \infty$  вероятность  $p_e(t)$  стремится к стационарному значению, не зависящему от законов распределения случайных величин  $\tau$  и  $\tau_e$ :

$$\lim p_e(t) = k_e = \frac{T}{T+T_e}$$

Стационарную величину  $k_e$  называют коэффициентом готовности. Он характеризует долю общего времени, в течение которого изделие работоспособно, от общего времени работы и восстановления.

Наработка изделия между плановыми обслуживаниями  $T_{ob}$  зависит от его надежности. Если между обслуживаниями не происходило износовых отказов, то ВБР за время  $T_{ob}$ .

$$P(T_{ob}) = e^{-T_{ob}/T}.$$

Т.к.  $T_{ob} \neq 0$ , то часть изделий откажет за время  $T_{ob}$ . Эти изделия потребуют внеплановых обслуживаний. Т.о.  $T_{cp}$  (среднее время между обслуживаниями)  $< T_{ob}$  и

$$T_{cp} = \int_0^{T_{ob}} P(t) dt,$$

а для экспоненциального закона надежности:

$$T_{cp} = \int_0^{T_{ob}} e^{-t/T} dt = T \cdot Q(T_{ob}).$$

При малых значениях отношения  $-T_{ob}/T \rightarrow T$  и  $T_{ob}$  близки друг к другу.

#### 4.2. Основное содержание работ по обслуживанию и ремонту ГТД

По своим целям все виды работ при обслуживании, включая ремонты, можно разделить на следующие группы:

1. Регулярное обслуживание нормально работающих двигателей, т.е. заправки, регулировки и другие подобного рода работы.
2. Контроль состояния элементов конструкций и систем двигателя для выявления отказов и неисправностей, в том числе в ранней стадии развития, и устранение их последствий.
3. Профилактические замены элементов и агрегатов для предотвращения износовых отказов.
4. Восстановление работоспособных двигателей, вышедших из строя в результате отказов.
5. Введение в двигатель улучшающих мероприятий, разработанных на основе опыта его производства и использования.

Кроме работ первой группы, производимых всегда эксплуатирующими двигатели организациями непосредственно на объектах, на которых двигатели установлены, остальные виды работ могут



проводиться в зависимости от их сложности или эксплуатирующими организациями, или на ремонтных заводах.

Регламенты плановых обслуживаний предусматривают работы, многие из которых аналогичны для не равных ГТД. Эти работы можно классифицировать на вспомогательные, работы по очистке и промывке, дефектацию, смазочно-заправочные, работы по устранению обнаруженных неисправностей.

Время обслуживания зависит как от основных и вспомогательных работ, так и от ряда других факторов, в частности, организационных. Полное время обслуживания:

$$t_{обсл} = t_{осн} + t_{всп} + t_{конт} + t_{зак} + t_{пер}$$

$t_{осн}$  и  $t_{всп}$  – время на выполнение основных и вспомогательных работ,

$t_{конт}$  – время на технический контроль,

$t_{зак}$  – время на заключительные операции обслуживания,

$t_{пер}$  – время перерывов в работах по обслуживанию.

Объем и содержание работ по обслуживанию, как и их частота, должны претерпевать изменения по мере освоения двигателя в производстве и эксплуатации и введения мероприятий по повышению его надежности.

В начале перечислены основные группы работ, содержание которых (кроме I группы) обуславливает и работы при ремонте двигателей в заводских условиях. Объем же и глубина этих работ при ремонте значительно больше, чем при обслуживании двигателя в эксплуатации.

После разборки двигателя контролю подвергаются все его детали, что позволяет полностью выявить их дефекты. Профилактические замены при ремонте могут распространяться на некоторые детали двигателя, вплоть до дисков отдельных ступней  $K$  и  $T$ . Введение улучшающих мероприятий в двигатель при ремонте может распространяться практически на любые его элементы и агрегаты.

Отремонтированные двигатели после сборки проходят контрольно-сдаточные испытания и подвергаются отладке.

#### 4.3. Эксплуатационная технологичность и ремонтопригодность ГТД

Эксплуатационная технологичность состоит из:

1. Технологичность при эксплуатации двигателя,
2. Технологичность при ремонте.

К технологичности при эксплуатации относится:

1. При подготовке к применению,
2. При выполнении эксплуатационных операций,
3. При выполнении работ после применения.

Технологичность при эксплуатации двигателя обуславливается свойствами конструкции, обеспечивающими простоту и удобство выполнения штатных работ, связанных с нормальным использованием двигателя.

В технологичность при техническом обслуживании и при ремонте входят:

1. Доступность и легкосъемность. Они имеют важное значение для сокращения времени и трудовых затрат при обслуживании и ремонте. Легкосъемность элемента можно характеризовать количеством человеко-часов  $\tau_{D(m)}$ , потребным на демонтаж (монтаж) при идеальном доступе. Доступность определяется соотношением основных трудовых затрат при монтажных или других работах  $t_{och}$  и трудоемкостью дополнительных работ  $t_{don}$ , без которых невозможно приступить к необходимым работам с данным элементом.

Можно использовать коэффициент доступности:

$$R_D = \frac{t_{och}}{t_{och} + t_{don}} = \frac{1}{1 + \frac{t_{don}}{t_{och}}}.$$

Чем меньше потребные дополнительные трудозатраты, тем  $R_D \rightarrow 1$ .

2. Контролепригодность – это свойство конструкции обеспечивать возможность прямого или косвенного профилактического контроля технического состояния или параметров агрегатов, элементов двигателя не равно объективными средствами и методами.
3. Модульность – под модульной конструкцией понимается такая конструкция, которая позволяет разобрать двигатель на отдельные модули (блоки), каждый из которых может независимо от других ремонтироваться и использоваться для укомплектования любых из двигателей данного типа.
4. Взаимозаменяемость – такое свойство конструкции, при которых из множества одинаковых элементов любой может быть установлен на данном двигателе без специальных операций подгонки.
5. Восстанавливаемость - это понятие применяется только к поврежденным элементам конструкции. Оно сильно зависит от достигнутого уровня технологических процессов при производстве и ремонте двигателей.

Все рассмотренные свойства обеспечиваются в процессе создания двигателя, т.е. эффективность обслуживания и ремонта, а, следовательно, и поддержание надежности двигателя в эксплуатации в большей мере будет зависеть от того, как двигатель сконструирован.

#### 4.4. Обслуживание двигателя по техническому состоянию

Опыт эксплуатации технических устройств и ГТО показал, что система технического обслуживания с заранее обусловленными фиксированными величинами недоработки между планово-профилактическими работами обладает некоторыми «минусами» и не является экономически оптимальным. Это привело к внедрению более совершенной системы технического обслуживания по состоянию объекта обслуживания.

Сущность системы обслуживания по состоянию сводится к тому, что те или иные работы на двигателе производятся не через регламентированные сроки наработки, а при возникновении необходимости, обусловленной техническим состоянием конкретного экземпляра двигателя и его

элементов. Метод основан на постоянном контроле технического состояния двигателя и эффективен лишь при наличии развитой системы раннего обнаружения его неисправностей.

Рассмотрим модель обслуживания по состоянию. Пусть  $\eta(t)$  - монотонная случайная функция времени, соответствующая какому-то параметру изделия, а  $\eta_{om}$  - предельный уровень параметра, пересечение реализацией случайного процесса  $\eta(t)$  ведет к отказу. Пусть  $\eta_{np.om}$  – предкритический уровень контролируемого параметра, а  $\eta_{om} - \eta_{np.om}$  - допуск, упреждающий отказ. Стратегия обслуживания по техническому состоянию в большинстве случаев строится так, чтобы момент контроля и обслуживания  $T_{ob}$  отвечал бы условию:  $\eta_{np.om} \leq \eta(T_{ob}) < \eta_{om}$ .

Хотя в некоторых случаях допускается и условие  $\eta(T_{ob}) = \eta_{om}$ , т.е. работа до отказа.

Важным условием обеспечения высокой надежности ГТД при обслуживании их по состоянию является также установлением обоснованных ограничений сроков службы наиболее ответственных элементов конструкции, в первую очередь – дисков турбины и компрессора.

Индивидуализация содержания и сроков обслуживания каждого экземпляра двигателя и даже его отдельных элементов, свойственная обслуживанию по состоянию, усложняет управление этой системой, особенно при больших парках двигателей.

Получаемый экономический эффект от обслуживания ГТД по состоянию очень значителен. Так при приблизительно 20% ↓ некоторых запасных частей, общая стоимость обслуживания и ремонтов сокращается примерно на 25% .

#### 4.5. Цели и методы контроля состояния двигателей в эксплуатации

Методы контроля состояния ГТД отличаются от методов контроля его режима главным образом тем, что должны обеспечивать обнаружение возникающих в эксплуатации отказов и неисправностей в возможно более ранней стадии их развития.

Контроль состояния двигателя призван обеспечить решение следующих основных задач:

1. Получение оперативной информации о состоянии каждого экземпляра двигателя для обоснованного принятия решения о его дальнейшем использовании в эксплуатации, или отправке в ремонт и т.п.
2. Прогнозирование и предупреждение развития отказов в целях максимально возможного сокращения числа отказов при выполнении двигателем своих функций и в снижении стоимости восстановительных ремонтов.
3. Локализация отказов и идентификация их причин и признаков с целью минимизации объема работ по поиску и устранению дефектов.
4. Выработка решений, связанных с планированием обслуживания (контроля, ремонтов и т.п.).

Контроль состояния двигателя должен образовывать систему взаимодополняющих методов, тесно связанных с конструкцией двигателя, его назначением и характером использования. Такая система должна контролировать технические характеристики двигателя, обнаруживать повреждение и разрушение механических элементов, опасные дефекты конструкции.

При разработке систем контроля состояния ГТД должны учитываться степень опасности и динамика развития отказов, раннее обнаружение которых такая система призвана обеспечить. Для авиационного ГТД можно разбить все отказы на следующие 3 группы в зависимости от динамики их развития:

1. Очень быстро развивающиеся отказы (опасный заброс температуры, помпаж).
2. Отказы, способные привести к аварийному состоянию двигателя за время, не превышающее время полета (масляное голодание).
3. Медленно развивающиеся отказы, опасное развитие которых за время полета практики исключено (износ зубьев шестерен).

#### 4.6. Средства раннего обнаружения неисправностей ГТД

Опыт эксплуатации ГТД показывает, что большинство неисправностей может быть в достаточно ранней стадии развития обнаружено с помощью немногих средств контроля состояния двигателей.

Наибольшую диагностическую ценность имеют 4 группы средств и методов контроля:

1. Контроль масла.
2. Контроль вибраций.
3. Оптические и другие методы контроля ценностей поверхностей деталей, образующих проточную часть двигателя.
4. Регистрация и регулярный анализ термогазодинамических параметров двигателя.

#### Контроль масла

1. Магнитные пробки (детекторы стружки) – позволяют при обслуживании двигателя проконтролировать наличие в масле не задерживаемых фильтрами мелких частиц магнитных материалов, являющихся продуктами износа.
2. Сигнализаторы стружки – приборы, сигнализирующие о появлении стружки в масле в процессе работы двигателя и полезны для обнаружения быстроразвивающихся дефектов.
3. Анализ проб масла на содержание в нем продуктов износа – чрезвычайно чувствительный метод, с помощью которого износ может быть обнаружен даже за сотни часов до того, как разрушение достигнет опасной стадии.
4. Контроль долива масла позволяет оценивать тенденции в изменении расхода масла.
5. Контроль омического сопротивления масляной пленки.

#### Контроль вибрации

1. Наружные вибродатчики. Устанавливаются на двигателях с целью контроля уровня вибраций с роторной частотой.
2. Встроенные вибродатчики. Устанавливаются непосредственно на тех этапах конструкции ГТД, состояние которых контролируются.
3. Вибрационная и виброакустическая диагностика – объединяют целый ряд методов обнаружения неисправностей двигателей, связанных с вибрациями и колебаниями.

#### Визуальные и другие методы контроля целостности

1. Оптические трубы (эндоскопы или бароскопы) представляют собой оптические приборы со встроенными источником света, позволяющие при относительно большом увеличении рассматривать внутренние поверхности двигателя.

2. Ультразвуковой и токовихревой контроль.
3. Рентгеноскопия – для контроля ряда внутренних элементов конструкции ГТД.

#### Регистрация и анализ параметров рабочего процесса

Сущность метода заключается в определении отклонений приведенных к САУ термогазодинамических параметров от их исходного уровня на расчетном режиме работы.

#### Некоторые другие средства контроля состояния ГТД

1. Счетчики наработки и числа циклов.
2. Оптические пиromетры.
3. Контроль выбега ротора.
4. Обнаружение металлических частиц в потоке.
5. Ионизационные сигнализаторы горения.

### 4.7. Методы технической диагностики и их применение для анализа состояния ГТД

Под методами технической диагностики понимают научное направление, связанное с распознанием состояния технических объектов. Состояние объекта описывается совокупностью признаков (параметров), используя которые, можно с помощью тех или иных методов технической диагностики отнести данное состояние к одному из классов (диагнозов).

Для решения задач распознавания состояний применяют как детерминистские, так и вероятные методы. При использовании детерминистских методов распознавания обычно описывают состояния объекта системой параметров  $x_j$ , образующих вектор  $\vec{X}$ .

При использовании вероятностных алгоритмов распознавания состояние объекта чаще всего описывается с помощью комплекса признаков  $(k_1, k_2 \dots k_j)$ , имеющих дискретные значения.

#### Метод Байеса

Пусть имеется одно из состояний объекта  $D_i$  и признак  $k_j$ , встречающийся при этом состоянии. Тогда,

$$P(k_j) \cdot P\left(\frac{D_i}{k_j}\right) = P(D_i) \cdot P\left(\frac{k_j}{D_i}\right),$$

откуда получаем формулу Байеса:

$$P\left(\frac{D_i}{k_j}\right) = \frac{P(D_i) \cdot P\left(\frac{k_j}{D_i}\right)}{P(k_j)}.$$

Если обследование проводится по комплексу признаков  $k$ , включающему признаки  $(k_1, k_2 \dots k_j)$ , то при реализации этого комплекса признаков:

$$P\left(\frac{D_i}{k}\right) = \frac{P(D_i) \cdot P\left(\frac{k}{D_i}\right)}{P(k)}.$$

## 5. Методы установления ресурса двигателя

### 5.1. Ресурс двигателя как технико-экономическая категория

Ресурс элемента как наработку до предельного состояния можно более или менее удовлетворительно описать физическими или статистическими моделями. Эти модели могут отражать исчерпание его долговечности и учитывать характер нагружения, рассеивание свойств элемента и некоторые другие факторы.

Технико-экономическое содержание понятие ресурса ГТД, правильное значение которого требует учета многих факторов, в том числе физических, изменение свойств двигателя во времени, и экономических, целесообразность дальнейшего увеличения ресурса при конкретных условиях эксплуатации, обслуживания и ремонта.

Важнейшим моментом при установлении ресурса является правильный учет связи ресурса и надежности. Критерии, характеризующие выполнение двигателем основных функций и эксплуатационные затраты, будут определять эффективность системы установления ресурса. А величина ресурса, в свою очередь, будет влиять на уровень отказов двигателя.

Обозначим критерий, характеризующий выполнение ГТД своих функций с требуемой надежностью через  $S_1$ , а критерий экономической эффективности увеличения ресурса – через  $S_2$ . Тогда модель процесса увеличения ресурса в самом общем виде может быть представлена следующим образом:

$$S_2(\tau, \lambda, \omega) \rightarrow \max \text{ при } S_1(\tau) \geq S_0, \text{ где}$$

$\tau$  - величина ресурса, являющаяся зависимой переменной или управляемым параметром,

$\lambda, \omega$  – интенсивность и ... (независимые переменные).

$S_0$  – предельно допустимый уровень критерия  $S_1$  (безопасности полетов).

Многообразие и сложность связей, усложняющих систему установления ресурса, делает чрезвычайно трудной задачу объективного определения оптимального ресурса.

На ранних этапах эксплуатации ГТД при небольших его ресурсах, когда суммарная наработка в эксплуатации  $t_{\Sigma}$  и соответственно надежность еще не велики, во многих случаях применяется система установления ресурса двигателя по ресурсу наиболее слабого элемента в самых напряженных условиях использования. Такую систему называют системой установления фиксированного ресурса.

При дальнейшем наращивании ресурса двигателя по мере освоения его в производстве и эксплуатации следует стремиться к дифференцированному ресурсу. Эта система основывается на учете таких факторов, как неравная долговечность отдельных узлов и элементов двигателей, влияние на надежность конкретных условий эксплуатации и др.

Предельной формой дифференциации ресурса является эксплуатация ГТД по состоянию.

### ***5.2. Установление и увеличение ресурса ГТД***

При любой системе установления ресурса должно быть надежно обоснованы предельно допустимые величины наработки ответственных элементов конструкций ГТД. С целью получения экспериментальных обоснований предельных ограничений по наработке проводятся циклические или эквивалентные ускоренные испытания.

Материалы по расчетной долговечности и результаты ускоренных испытаний являются основой назначенного ресурса ГТД, т.е. ресурса до предельного состояния.

На первых этапах эксплуатации новых двигателей целесообразно устанавливать им фиксированный ресурс в связи с преимуществом – возможностью тщательно контроля в заводских условиях состояния двигателей после выработки ими первого ресурса (от сотен часов до 2000 часов).

После успешного прохождения длительных стендовых и эксплуатационных испытаний двигателям устанавливается первоначальный ресурс.

Дальнейшее увеличение ресурса (в пределах назначенного) после выработки двигателями первой установленной его величины производят ступеньками, опираясь, главным образом, на опыт эксплуатации.

Следующим шагом при условии положительного опыта эксплуатации двигателей данного типа и высокой долговечности основных узлов и деталей может явиться переход к эксплуатации по состоянию. Для этого требуется достаточная контролепригодность и эксплуатационная технологичность конструкции двигателя, организация сбора и оперативной обработки диагностической информации.