

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра «Коммерции и организации экономической деятельности»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.ДВ.10.02 Надежность и долговечность машин, приборов и
оборудования**

Направление подготовки (специальность) 38.03.06 Торговое дело

Профиль образовательной программы Коммерция

Форма обучения очная

Оренбург 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций
- 1.1 Лекция № 1 Постановка задач и математические модели теории надежности. (ПО ИНТЕР. ФОРМЕ)
- 1.2 Лекция № 2 Классификация нагрузок и воздействий (ПО ИНТЕР. ФОРМЕ).....
- 1.3 Лекция № 3 Многоцикловая и малоцикловая усталость (ПО ИНТЕР. ФОРМЕ).....
- 1.4 Лекция № 4 Элементы механики ПО ИНТЕР. ФОРМЕ).....
- 1.5 Лекция № 5 Структурные модели накопления повреждений (ПО ИНТЕР. ФОРМЕ)...
2. Методические указания по проведению семинарских занятий
- 2.1 Семинарское занятие № С-1 Постановка задач и математические модели теории надежности
- 2.2 Семинарское занятие № С-2 Классификация нагрузок и воздействий
- 2.3 Семинарское занятие № С-3 Многоцикловая и малоцикловая усталость
- 2.4 Семинарское занятие № С-4 Элементы механики
- 2.5 Семинарское занятие № С-5 Структурные модели накопления повреждений

1 Конспект лекций

Лекция № 1 Постановка задач и математические модели теории надежности

Надежность – это свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам, условиям использования, технического обслуживания, ремонта и транспортирования.

Под объектом понимается техническое устройство, комплектующие изделия, материалы, топливо и т.д. Естественно, что надежность – свойство, присущее машинам и оборудованию.

Надежность – сложное свойство, включающее, в свою очередь, такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Под безотказностью понимается свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение определенного времени или определенной наработки.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказа, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Под сохраняемостью понимается свойство объекта непрерывно сохранять исправное состояние в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Для различных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную значимость. Например, тормозные устройства, сигнализаторы аварийной ситуации и другие технические средства

должны обладать долговечностью, легковые и грузовые автомобили – долговечностью и ремонтпригодностью, лаки, краски – сохраняемостью.

Рассмотрим глубже приведенные определения свойств. Начнем с того, что безотказность и долговечность отражают две стороны события – отказ: первая – то, что он не произойдет в течение заданного времени, вторая – время, в течение которого он не произойдет. Поскольку отказ является случайным событием, то оба эти свойства характеризуются случайными величинами.

Всякое изделие с наработкой в большей или меньшей степени утрачивает безотказность. Вместе с тем есть изделия, продолжительность эксплуатации которых по разным причинам ограничена, в некоторых случаях изделия используются один раз. В случаях, когда продолжительность эксплуатации ограничена, безотказность его становится важнейшей составляющей надежности.

В тех случаях, когда продолжительность эксплуатации изделия неограниченна или очень велика и к тому же последствия отказов не связаны со значительным ущербом, на первый план в комплексе свойств, составляющих надежность, выходит долговечность.

Оценка долговечности изделия во многом зависит от того, является ли оно невосстанавливаемым или восстанавливаемым. На первый взгляд, невосстанавливаемое изделие в случае отказа становится непригодным для дальнейшего использования. В действительности это не так. Во-первых, наряду с полным отказом, т.е. полной потерей работоспособности изделия, существуют частичные отказы, возникновение которых приводит к снижению эффективности использования изделия по прямому назначению. Во-вторых, одно и то же изделие в зависимости от условий или этапов эксплуатации может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

Для восстанавливаемых изделий существенное значение приобретает ремонтпригодность.

Отличительными особенностями этих свойств является то, что свойство «технологичность» обычно относится к основному производству, в котором все детали и узлы изготавливаются заново и ранее не эксплуатировались.

Ремонтпригодность можно рассматривать как технологичность ремонтного производства, в котором часть деталей, узлов и агрегатов изготавливается заново, часть ранее эксплуатировавшихся деталей, узлов и агрегатов подвергается восстановительным технологическим операциям. Таким образом, пригодность изделия к восстановлению представляет то, чем в первую очередь характеризуется ремонтпригодность.

Другой отличительной особенностью ремонтпригодности от технологичности является различие условий, в которых осуществляется ремонт и основное производство. Текущий ремонт проводится в условиях, близких условиям эксплуатации и ограниченных возможностях для устранения причин, снижающих работоспособность изделия.

Показатели надежности

Количественную характеристику свойств продукции, составляющих ее качество, называют показателями качества продукции. Надежность – сложное свойство, составляющее качество. Поэтому количественные характеристики свойств, составляющих надежность, принято называть показателями надежности объекта. Аналогичным образом по количеству свойств, которые характеризуют тот или иной показатель надежности, называют: единичным показателем надежности – количественную

характеристику только одного свойства надежности объекта; комплексным показателем надежности – двух или более свойств надежности.

Свойства, составляющие надежность, характеризуются значительной степенью изменчивости. Невозможно точно указать, например, момент времени в который произойдет поломка той или иной детали машины. Отказы происходят в случайные моменты времени. Поэтому количественная оценка безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости различных изделий связана со случайными величинами, подчиняющимися вероятностным законам. При рассмотрении показателей надежности как единичных, так и комплексных руководствуются законами теории вероятностей и математической статистики, применяемыми в этих науках понятиями.

Показатели безотказности

Вероятностью безотказной работы в пределах заданной наработки называется вероятность того, что в пределах заданной наработки не произойдет отказ. Иногда этот показатель кратко называют вероятностью безотказной работы, что, строго говоря, лишено смысла.

К оценке безотказности технических устройств можно подойти и по-другому, поставив вопрос: какова в среднем наработка устройства, предшествующая отказу? Этот показатель безотказности называется средней наработкой до отказа, причем «средняя наработка» понимается, как математическое ожидание наработки до отказа.

Рассмотрим следующую ситуацию. Эксплуатируется невосстанавливаемое техническое устройство, т.е. такое, которое после первого отказа заменяется таким же новым. В этом случае плотность распределения наработки устройства до первого отказа $\lambda(t)$ будет

определяться как плотность распределения до отказа вообще $f(t)$ (т.е. не обязательно первого), деленная на вероятность безотказной работы устройства при рассматриваемой наработке.

Например, перегорание нити накаливания электрических ламп происходит в результате многих случайных причин и, в частности, при мгновенных повышениях напряжения в сети, различного рода механических воздействиях и т.п. Указанные явления происходят в случайные моменты времени с определенной вероятностью (в случае конечного интервала времени) или плотностью вероятности (в случае бесконечно малого интервала времени). Это суть вероятность или плотность вероятности того, что отказ произойдет в заданном интервале независимо от того, были ли до этого отказы или нет. Такие вероятность или плотность вероятности равны произведению условной вероятности отказа при условии, что при заданной наработке лампочка работала безотказно (иначе бы она перегорела), и вероятности безотказной работы лампочки при заданной наработке:

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

или

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

Аналогичным образом автомобильная шина на каждом километре пробега x , $x + \Delta x$ с вероятностью $f(x)$ может получить неустранимые повреждения. Условная вероятность того, что в интервале пробега x , $x + \Delta x$ шина получит неустранимые повреждения при условии безотказной работы при пробеге x километров равна

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{P(x)} .$$

Функция $\lambda(t)$ [$\lambda(x)$ – в зависимости от размерности наработки] характеризует интенсивность отказов невосстанавливаемого технического устройства в интервале наработки $t, t + \Delta t$. Поэтому условную вероятность (в случае дискретной наработки) или условную плотность вероятности (в случае непрерывной наработки) отказа невосстанавливаемого технического устройства, определенную для рассматриваемой наработки при условии безотказной работы до момента отказа, называют интенсивностью отказа.

Рассмотрим важный и распространенный случай геометрического распределения (в случае дискретной наработки) и экспоненциального распределения (в случае непрерывной наработки).

Известно, что наработка до отказа X имеет геометрическое распределение, если

$$P(X = k) = q^k p, k = 0, 1, 2, \dots ,$$

где p – вероятность отказа в одном испытании; $q = (1 - p)$ – вероятность того, что отказ в данном испытании не произошел. Испытанием, например, может быть один размен монеты в автомате, срабатывание реле и т.п. Вероятность того, что отказ произойдет в одном из испытаний ($j = 1, 2, \dots , k$) равна

$$p\{1 + q + \dots + q^k\} = \frac{1 - q^{k+1}}{1 - q} p = 1 - q^{k+1} .$$

Следовательно, вероятность безотказной работы устройства в k испытаниях равна

$$P = 1 - q^k.$$

и интенсивность отказов

$$\lambda = \frac{q^k P}{q^{k+1}} = \frac{P}{q}$$

при геометрическом распределении наработки до отказа не зависит от числа испытаний, предшествующих отказу. Вместе с тем, известно, что математическое ожидание и дисперсия этого числа в случае геометрического распределения соответственно равны

$$E(X) = q/p \text{ и } D(X) = q/p^2$$

и, стало быть, в рассматриваемом случае интенсивность отказов является обратной величиной по отношению к математическому ожиданию числа испытаний, предшествующих отказу в интервале $0, \infty$.

Интенсивность отказов можно рассматривать как меру старения, износа устройства. Отсюда факт нулевой интенсивности отказов имеет простой физический смысл: устройство практически не стареет. В этом случае математическое ожидание числа испытаний, предшествующих отказу, должно быть бесконечно, а вероятность отказа в одном испытании равна нулю. Поскольку это не так, то нетрудно заметить, что нестареющее

устройство может работать в случайным образом меняющихся условиях, например, при мгновенных скачках напряжения электрического тока, наличии на дорогах острых предметов, способных нанести неисправимые повреждения автомобильным шинам, наличии очень твердых включений в металле, приводящих к поломке режущего инструмента и т.п.

Аналогом геометрического распределения для непрерывных случайных величин является экспоненциальное распределение. Выше мы рассматривали наработку до отказа $X = 0, 1, 2, \dots$ как число испытаний. Вместо единичного интервала можно рассматривать интервал ΔX и тогда величина X будет принимать значения $0, \Delta X, 2\Delta X$ и т.д. Вероятность того, что в интервале $(X, X + \Delta X)$ произойдет отказ обозначим $\lambda\Delta X$ и будем рассматривать случаи, при которых вероятность более одного отказа в интервале ΔX практически равна нулю. В этом случае можно записать

$$P(X + \Delta X) = P(X)\{1 - \lambda\Delta X\}$$

или

$$\{P(X + \Delta X) - P(X)\} / P(X)\Delta X = -\lambda .$$

Полагая $\Delta X \rightarrow 0$ и заменяя дискретную переменную X на непрерывную t , получим

$$\frac{1}{P(t)} \frac{dP}{dt} = -\lambda ,$$

откуда следует, что вероятность безотказной работы устройства за время t равна

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

а вероятность того, что за время t произойдет отказ

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

Плотность этого распределения определяется как

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

и, обращаясь к выражению (*), получаем

$$f(t)/P(t) = \lambda(t) = \lambda \text{ ,}$$

т.е., в случае экспоненциального распределения времени безотказной работы технического устройства интенсивность его отказов не зависит от времени.

Математическое ожидание и дисперсия экспоненциального распределения соответственно равны

$$E(t) = \frac{1}{\lambda} = T, \quad D(t) = T^2,$$

где T – среднее время безотказной работы устройства.

Физический смысл этих зависимостей такой же, как и в случае геометрического распределения с той лишь разницей, что дискретная переменная X заменена на непрерывную t , единичные интервалы на бесконечно малые, конечное число их – на бесконечно большое, но при условии, что длина всех интервалов принимает любые значения от 0 до ∞ . Отметим, что постоянная интенсивность отказов является частным случаем более общего случая, когда интенсивность отказов $\lambda(t)$ является функцией наработки.

Перейдем теперь к восстанавливаемым техническим устройствам. В начальный момент времени устройство начинает работу и работает до отказа, который происходит в случайный момент времени t . Предполагается, что устройство восстанавливается практически мгновенно, т.е. время на замену детали, узла, агрегата или на устранение причины отказа каким-либо другим способом пренебрежимо мало по сравнению со средней наработкой до отказа. Процесс возникновения отказов устройства и его восстановление образует поток отказов, причем число отказов $r(t)$ в течение времени t является случайной величиной, подчиняющейся определенному распределению вероятностей. Если это

распределение известно, то всегда можно определить математическое ожидание числа отказов в течение времени t

$$E\{r(t)\} = \Omega(t)$$

и математическое ожидание числа отказов в интервале времени t_1, t_2

$$E\{r(t_1, t_2)\} = \Omega(t_2) - \Omega(t_1)$$

Функция

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} E\{r(t, t + \Delta t)\} = \Omega'(t)$$

характеризует интенсивность потока отказов. Эта функция является частным случаем плотности вероятности возникновения отказов восстанавливаемого объекта, определяемого для рассматриваемого момента времени. Ее принято называть параметром потока отказов. Для ординарных потоков без последствия интенсивность потока совпадает с параметром потока. В этом случае стандартизованный показатель «Параметр потока отказов» может быть выражен

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(x) dX$$

Важным показателем безотказности восстанавливаемых объектов является наработка на отказ, под которой понимается отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Вообще математическое ожидание числа отказов является функцией наработки объекта

(устройства). Это легко понять, если учесть, что вследствие старения объекта, т.е. потери его полезных свойств с наработкой, отказы следуют более часто.

Показатели долговечности

Важным показателем долговечности является гамма-процентный ресурс, т.е. наработка, в течение которой техническое устройство не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов. Этот показатель отражает требование к долговечности устройства и означает ресурс, при котором в среднем продолжает функционировать γ процентов технических устройств. Наиболее часто $\gamma = 90$ и тогда говорят: девяностопроцентный ресурс, $\gamma = 95$ – девяностопятипроцентный ресурс. При $\gamma = 50$ гамма-процентный ресурс называется медианным. Статистически медианный ресурс определяется как средний член упорядоченной выборки ресурсов объема при нечетном N или среднее арифметическое двух средних членов упорядоченной выборки при четном N .

Гамма-процентный ресурс определяется обработкой результатов испытаний соответствующих технических устройств. Тем самым устанавливается фактический гамма-процентный ресурс. Наряду с этим в стандартах, ТУ и других НТД устанавливаются требования к гамма-процентному ресурсу, которые должны быть выполнены разработчиками и изготовителями объекта. Проверка выполнения указанных требований осуществляется в процессе контрольных испытаний.

Средним ресурсом называется математическое ожидание ресурса. Следует отметить, что нередко в литературе встречаются неправильные толкования относительно среднего ресурса как показателя надежности. Они сводятся к тому, что средний ресурс не может применяться как показатель надежности, поскольку примерно половина изделий будет обладать ресурсом меньше среднего. Но средний ресурс следует рассматривать как параметр распределения ресурса, причем для правильного представления о распределении ресурса как случайной

величины надо знать вид этого распределения (гамма, Вейбулла, нормальное, логарифмически нормальное и др.) и другие его параметры. В частном случае, когда ресурс подчинен экспоненциальному распределению достаточно знать только один параметр – средний ресурс.

Когда известны вид распределения и его параметры, обоснование норм в стандартах для приемки изделий по результатам испытаний осуществляется по соответствующим правилам. В этой связи отметим, что указанные выше нормы для гамма-процентного ресурса также устанавливаются по аналогичным правилам. Но это уже специальный вопрос, выходящий за пределы рассматриваемой темы.

Назначенным ресурсом называется суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния. Этот вид ресурса чрезвычайно важен для особо ответственных изделий, выход из строя которых может повлечь тяжелые последствия (аварии, катастрофы).

В зависимости от возможностей и целесообразности восстановления изделия с назначенным ресурсом оно может быть направлено в ремонт или списано.

В тех случаях, когда для изделия не устанавливается назначенный ресурс, используются следующие понятия:

средний ресурс до среднего (капитального) ремонта, т.е. средний ресурс от начала эксплуатации объекта до его первого среднего (капитального) ремонта;

средний ресурс между средними (капитальными) ремонтами, т.е. средний ресурс между смежными средними (капитальными) ремонтами объекта;

средний ресурс до списания, т.е. средний ресурс объекта до его списания вследствие невозможности дальнейшего использования его по назначению.

Наряду с понятием «ресурс» существует понятие «срок службы объекта», под которым вместо наработки подразумевается календарная продолжительность существования объекта, предшествующая наступлению предельного состояния. С этим понятием связаны производные понятия: гамма-процентный срок службы, средний срок службы до среднего (капитального) ремонта и т.д. по аналогии с тем, как это было указано для ресурса.

Показатели ремонтпригодности

Ремонтпригодность принято оценивать двумя единичными показателями: вероятность восстановления в заданное время, т.е. вероятность того, что время восстановления работоспособности объекта не превысит заданного, и среднее время восстановления, т.е. математическое ожидание времени восстановления работоспособности.

Нетрудно заметить, что из двух объектов будет более пригоден к ремонту тот, который будет обладать большей вероятностью восстановления за заданное время или тот, у которого меньшее среднее время восстановления.

Показатели сохраняемости

Физическое различие между долговечностью и сохраняемостью заключается в причинах, обуславливающих переход к предельному состоянию. Долговечность характеризует способность изделия сохранять

полезные свойства в процессе его функционирования. Действующие при этом механические, электрические тепловые и другие нагрузки по мере наработки приводят к накоплению ущерба в изделии, завершающегося его отказом. В отличие от этого сохраняемость характеризует способность продукции сохранять полезные свойства во времени вне зависимости от того функционирует продукция или не функционирует. Потеря полезных свойств при этом происходит вследствие физических, химических, биологических процессов, протекающих в продукции и окружающей среде. Так, коррозия металлов является следствием воздействия окружающей среды и в частности кислорода на металл, продукты питания портятся вследствие происходящих в них биологических процессов и т.д.

Что же касается формального описания потери полезных свойств продукции, то оно обладает общностью для долговечности и сохраняемости. Поэтому последняя характеризуется гамма-процентным сроком сохраняемости и средним сроком сохраняемости, смысл которых аналогичен соответствующим показателям долговечности.

Усталость металлов

Усталость металлов оценивается количеством циклов, которое при определенной нагрузке выдерживает испытываемое изделие. Заметим, что, как бы строго не была указана нагрузка на изделие, точно нельзя указать число циклов, при котором оно сломается. Это число случайное и распределено с определенными из опыта математическим ожиданием и дисперсией.

Экспериментальное изучение надежности металлов позволило сделать следующие основополагающие выводы.

1. Зависимость вероятности выживания испытываемого образца металла $ls(N)$ от числа циклов N при заданной нагрузке S обладает двумя важными свойствами:

для данной нагрузки S вероятность $ls(N)$ монотонно убывает по мере возрастания N ;

для данного числа циклов N вероятность $ls(N)$ монотонно возрастает по мере убывания S , что следует из физического смысла.

2. Зависимости $ls'(N)$ и $ls''(N)$ при $S' > S''$ нигде не пересекаются. Если в процессе обработки результатов испытаний имеют место пересечения, то их следует приписать ошибкам наблюдений или отсутствию однородности испытываемых образцов.

3. При нагрузке $S = 0$ образцы не разрушаются, поэтому существует такая нагрузка $S \neq 0$, при которой разрушение образцов начинается, когда число циклов превышает определенную величину. Максимальное число циклов, которое при заданной нагрузке образцы выдерживают без поломок с вероятностью единица, называют минимальным сроком службы при заданной нагрузке. В терминологии надежности правильнее было бы это понятие определить термином ресурс при заданной нагрузке. Наряду с этим понятием существует понятие «истинный предел усталости» (в некоторых источниках – истинный предел выносливости), под которым понимают наибольшую нагрузку, которую наверняка выдержит образец при бесконечно большом числе циклов. Для истинного предела усталости $ls(N \rightarrow \infty) = 1$. Оцененный минимальный срок службы можно проверить экспериментально, задав число циклов, которое по этой оценке обязаны выдержать все до единого испытываемые образцы. Оценку же истинного предела усталости опытом проверить нельзя, так как испытания не могут бесконечно продолжаться. Поэтому обычно ограничиваются достаточно большим числом циклов, например, 10^7 и предел усталости определяют как наибольшую нагрузку, которую наверняка выдерживает образец в

течение 10^7 циклов. Любая теория должна проверяться экспериментом, но пока вопрос о поведении образцов при числе циклов значительно больших 10^7 остается малоизученным экспериментально. Так или иначе, оценка по 10^7 циклам применяется в качестве оценки предела усталости, соответствующего на самом деле неограниченному числу циклов.

Вместо предела усталости некоторые авторы вводят понятие «медианная усталостная нагрузка», под которой понимают нагрузку, которую выдерживают после 10^7 циклов половина испытываемых образцов. Такой подход интерпретирует нагрузку как случайную величину и поэтому отличается от подхода, связанного с применением предела усталости. Оценка предела усталости очень чувствительна к исходным вероятностным предположениям, в то время как оценка медианы почти не зависит от вида распределения. С помощью медианной усталостной нагрузки удобно сравнивать между собой металлы, сплавы, режимы закалки и методы испытаний. Однако медиана не годится для выводов, касающихся техники безопасности и оценки надежности машин. Для решения этих вопросов требуется знать вероятность выживания, которая является функцией усталостной нагрузки. Эту вероятность удобно оценивать по отношению числа образцов, выдержавших заданную нагрузку, к общему числу испытывавшихся образцов. Исследования показали, что результаты испытаний хорошо согласуются с асимптотическим распределением наименьших значений, часто называемых распределением Вейбулла.