

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Иркутский государственный аграрный университет
имени А.А. Ежевского
Кафедра Технический сервис и общинженерные дисциплины**

Надежность технических систем

Учебно-методическое пособие

Иркутск 2021

УДК 631.3.004.67(075.8)

Б 435

Беломестных В. А. Надежности технических систем : учеб. – метод. пособие для выполнения лабораторных работ / В. А. Беломестных, М. К. Бураев – Иркутск : ИрГСХА, 2021. - 21 с.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Иркутской государственной сельскохозяйственной академии (протокол № 10 от 19.03.21)

В учебно-методическом пособии излагаются материалы, поясняющие физические основы, нарушающие работоспособность и снижающие уровень надежности технических систем, приведена методика проведения лабораторно – практических занятий с приведением необходимых исходных данных, примеров и контрольных вопросов.

Пособие подготовлено в соответствии с требованиями государственного образовательного стандарта, программы дисциплины «Надежность технических систем» и предназначено для выполнения лабораторных работ и самостоятельной работы студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 35.04.06 - “Агроинженерия”.

© Беломестных В.А., Бураев М.К.

© Издательство ИрГСХА, 2021

1. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПО ДАННЫМ ИСХОДНОЙ ОПЫТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Цель работы

Изучить методику обработки показателей надежности машин по данным опытной информации вероятностно-статистическим методом.

Теоретические сведения

Оценка надежности машин при помощи математических методов на основании накопленной статистической информации об их работе в реальных условиях эксплуатации позволяет выявить вероятностные закономерности и соотношения между случайными факторами, в различной мере влияющими на работоспособность, безотказность, долговечность и сохранность машин.

Система сбора и обработки информации о надежности сельскохозяйственной техники представляет собой совокупность мероприятий по получению достоверных сведений о надежности машин.

Опытная информация о количественных показателях надежности машин должна быть достоверной, полной, однородной, дискретной, своевременной.

Обработка и анализ опытной информации связаны с необходимостью изучения случайных событий, которые рассчитываются методами теории вероятности и математической статистики.

Цель сбора и обработки информации – совершенствование конструкции, технологии изготовления, сборки и испытания машин; разработка мероприятий по совершенствованию технического обслуживания и текущих ремонтов; повышения качества капитальных ремонтов и снижения затрат на их проведение; оптимизация норм расхода запасных частей.

Основные задачи системы сбора и вероятностно-статистической обработки опытной информации:

- определение количественной оценки показателей надежности машин;
- выявление конструктивных и технологических недоработок машин;
- выявление деталей, сопряжений, узлов, агрегатов лимитирующих надежность машин в целом;
- изучение закономерностей отказов;
- установление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность машин;
- установление нормируемых показателей надежности машин;
- разработка мероприятий по повышению надежности машин.

Статистическую оценку количественных показателей надежности дают совокупности объектов, объединенных единым признаком или свойством. Различают статистическую, генеральную и выборочную совокупность.

Если во время испытаний у машин будет зафиксирован показатель надежности, такая информация называется полной. Если же испытания ограничивают по времени или наработке машин и за это время не у всех машин зафиксирован показатель надежности, такую информацию называют усеченной.

При эксплуатации сельскохозяйственной техники трудно получить полную информацию о показателях надежности машин. В этом случае приходится иметь дело с усеченными или многократно усеченными выборками. Усеченную выборку можно представить следующим образом. Например, в эксплуатации находятся N объектов, из них за время t отказало n объектов при наработке T_1, T_2, \dots, T_n , а для остальных N_i объектов известно лишь то, что наработка их больше чем T_n . Усеченную информацию получают, когда испытания объектов проводятся по плану NUT. При этом наблюдения ведутся за N объектами до наперед заданной наработки T_n , независимо от того, у скольких объектов из числа N будут зафиксированы показатели надежности.

Задание. Определить средний доремонтный ресурс $T_{др}$ гильзы цилиндров двигателя ЯМЗ-238 и его доверительные границы при доверительной вероятности $\alpha_1 = 0,80$ и $\alpha_2 = 0,95$, восьмидесяти процентный гамма ресурс и вероятность доремонтной наработки от 2 до 3 тыс. мото-часов.

Пример вероятностно-статистической обработки опытной информации проводилось по плану NUT за двигателями ЯМЗ-238. Имеется исходная опытная информация по доремонтным ресурсам 70 гильз цилиндров в виде вариационного ряда (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Ресурс гильз цилиндров двигателя ЯМЗ-238 $T_{др}$, мото-ч

950	1750	2020	2400	2750	3300	3750
1300	1850	2020	2420	2780	3310	3840
1320	1850	2070	2420	2820	3380	3900
1410	1900	2150	2450	2870	3420	4100
1410	1940	2180	2500	2900	3500	4450
1520	1950	2200	2520	2910	3520	4600
1600	1960	2200	2540	3000	3580	4700
1710	1980	2260	2570	3150	3600	5020
1730	2000	2280	2650	3220	3650	5250
1730	2000	2290	2700	3250	3680	5500

Последовательность выполнения задания

1 Составить статистический ряд распределения ресурса $T_{др}$ гильзы с указанием частоты m_i , опытной вероятности (частоты) $P_{oni} = \frac{m_i}{N}$ и

накопленной опытной вероятности $\sum P_{oni} = \sum \frac{m_i}{N}$ по i -м частичным интервалам ряда.

2 Построить в масштабе гистограмму, полигон и график эмпирической интегральной функции распределения доремонтного ресурса (кривую накопленных опытных вероятностей).

3 Определить среднее значение ресурса $\bar{T}_{др}$, среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации v ряда значений ресурса.

4 Подобрать теоретический закон распределения ресурса, определить его параметры и значения (для частичных интервалов) дифференциальной $f(T)$ и интегральной $F(T)$ функций теоретического распределения, занести их в таблицу.

5 Построить графики функций $f(T)$ и $F(T)$ и сопоставить их с полигоном распределения и с кривой накопленных опытных вероятностей; по графику $F(T)$ установить 80 % γ ресурс гильзы и вероятность доремонтной наработки от 2 до 3 тыс. мото-часов.

6 Определить доверительные границы среднего ресурса $T_{др}^в$ и $T_{др}^н$ при доверительной вероятности при $\alpha_1 = 0,80$ и $\alpha_2 = 0,95$, а также наибольшую возможную относительную погрешность расчета $\pm \epsilon_\alpha$.

Пример выполнения расчетов показателей надежности

1 Полученные в результате наблюдений значения случайной величины – это доремонтный ресурс гильзы цилиндров $T_{др}$ – в упорядоченном виде, представляют собой вариационный ряд. Примером вариационного ряда служит упорядоченный ряд значений $T_{др}$ от 950 до 5500 мото-часов и представляет собой исходную опытную информацию по результатам наблюдений за двигателями в эксплуатационных условиях.

Вариационный ряд – первый этап статистической обработки результатов наблюдений. Здесь мы получаем первое представление о границах изменения случайной величины.

Ряд распределения включает в себя всю информацию о значениях показателей надежности изучаемых машин. При этом содержание опытной информации позволяет даже для очень многочисленной совокупности достаточно легко определить наиболее типичные значения отказа, измерить его вариацию, сделать предварительное заключение о форме распределения частот. Построение ряда распределения сводится к упорядочению исходных данных, которые представляют набор чисел наработки или величины износов до отказа. Основными этапами построения ряда распределения является определение числа интервалов (групп) и подсчет частот. Число интервалов зависит от объема опытной информации и величины вариации отказов

машин. Чем больше опытных данных, тем большее количество групп должно быть в ряду распределения. Обычно правильно составленный ряд содержит, в инженерных расчетах, от 5-15 интервалов. Нужное число интервалов может быть ориентировочно вычислено по формулам Штюргеса [4]:

$$K \approx 1 + 3,32 \times \lg n \quad (3.1)$$

Брукса и Каррузера: $K \approx 5 \times \lg n \quad (3.2)$

и другими авторами: $K \approx \sqrt{n} \quad (3.3)$

где K – число интервалов ряда распределения,
 n – объем опытной информации.

Интервалы должны быть одинаковыми и удобными по величине, иметь верхнюю и нижнюю границы, прилегать друг к другу и не иметь разрывов.

Ряд распределения может быть в виде таблицы, графика или в аналитической форме.

При составлении интервального ряда распределения область возможных значений случайной величины разбивается на отдельные частичные интервалы, каждый из которых имеет верхнюю и нижнюю границы. Далее определяют, какое число значений (из общего количества N) попадает в отдельные интервалы, то есть устанавливают частоты m_i по отдельным i – м интервалам, а затем и частоты $\frac{m_i}{N}$ тоже по интервалам.

Статистический ряд составляют в виде таблицы, состоящей из пяти строк: интервалы, середины интервалов, частота, опытная вероятность (частость) и накопленная опытная вероятность (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Статистический ряд распределения доремонтного ресурса гильзы цилиндров двигателя ЯМЗ-238

Частичные интервалы, тыс. мото-ч	0,5÷1,5	1,5÷2,5	2,5÷3,5	3,5÷4,5	4,5÷5,5
Середина интервалов T_{ci} , тыс. мото-ч	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Частоты m_i	5	30	20	9	6
Частоты $P_{on} = \frac{m_i}{N}$	0,0715	0,4285	0,2858	0,1285	0,857
Накопленные частоты $\sum P_{on} = \sum \frac{m_i}{N}$	0,0715	0,5000	0,7858	0,9143	1,0000

В приложении Б приведены варианты задания и указаны границы частичных интервалов. Всего в каждом варианте 5 или 6 интервалов.

При определении частоты m_i по интервалам нужно иметь в виду, что в интервал включают те значения, которые численно больше нижней границы, но меньше или равны верхней границы интервала.

При составлении таблицы необходимо учитывать, что сумма частот по интервалам должна быть равна 70, т.е. $\sum m_i = N$, и сумма частостей должна быть равна единице, т.е. $\sum \frac{m_i}{N} = 1,000$ Расчет частостей обычно производят с точностью до четвертого десятичного знака.

Проверку информации на наличие выпадающих точек осуществляют по критерию Ирвина, опытное значение которого определяется по формуле:

$$\lambda_{04} = \frac{T_i - T_{i-1}}{\lambda}, \quad (3.4)$$

где T_i и T_{i-1} – смежные (крайние) точки в сводной ведомости информации (таблице 3.1).

Полученные значения λ_{04} сравнивают с табличными значениями критерия Ирвина (приложение Ж). Если $\lambda_{04} < \lambda_{\text{т}}$, то такие точки «выпадают», т.е. должны быть исключены из информации как недостоверные. В этом случае необходимо перестроить статистический ряд с учетом уменьшения количества информации за счет выпавших точек, вновь рассчитав $T_{\text{др}}$, σ и ν .

Графическое построение опытного распределения

Таблица 3.2 содержит данные, необходимые для более наглядного, графического представления ряда распределения. Из графиков, характеризующих распределение случайных величины, по данным исходной опытной информации строят гистограмму и полигон, кривой накопленных (опытных) вероятностей.

При построении гистограммы на горизонтальной оси графика откладывают значения, соответствующие границам частичных интервалов, а на вертикальной – частоты или частости, также по отдельным интервалам. Масштаб ординат следует выбирать, придерживаясь, правила «золотого сечения»:

$$Y = 5 / 8 \cdot X,$$

где Y – наибольшая ордината;

X – абсцисса, соответствующая наибольшему значению наработки.

Далее строят прямоугольники, основания которых лежат на горизонтальной оси координат и равны величине частичных интервалов, а высоты равны частотам или частостям соответствующих интервалов. В результате получается ступенчатый многоугольник, или гистограмма рисунок 3.1.

Если теперь соединить прямыми линиями середины верхних (горизонтальных) сторон прямоугольников гистограммы, то получим полигон распределения в виде ломаной.

Примеры построения гистограммы и полигона распределения Тдр приведены на рисунках 3.1 и 3.2.

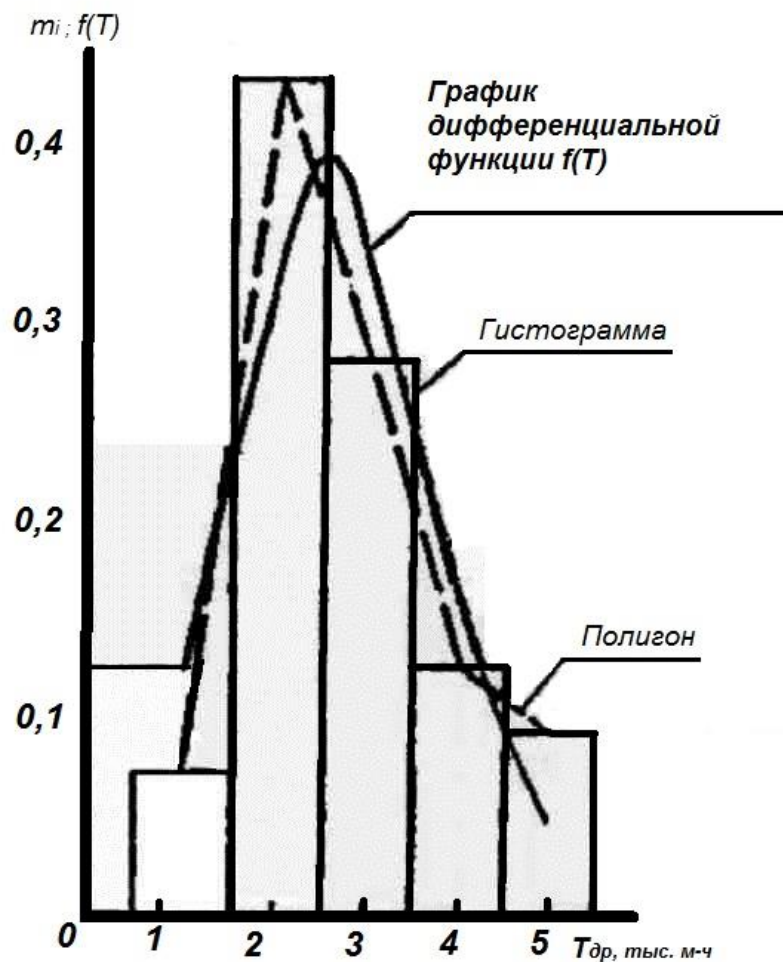


Рисунок 3.1 – Гистограмма и полигон распределения по доремонтным ресурсам $T_{др}$

Наиболее общей характеристикой распределения случайных величин является интегральная функция распределения $F(T)$, которая определяет вероятность того события, что случайная величина T будет меньше или равна наперед заданному t , то есть $F(T) = P(T \leq t)$. Эмпирическая интегральная функция распределения определяет частоту (опытную вероятность) события $T \leq t$, а теоретическая интегральная функция распределения - вероятность данного события. Функция распределения $F(T)$ может быть задана аналитически или представлена в виде графика (рисунок 3.2).

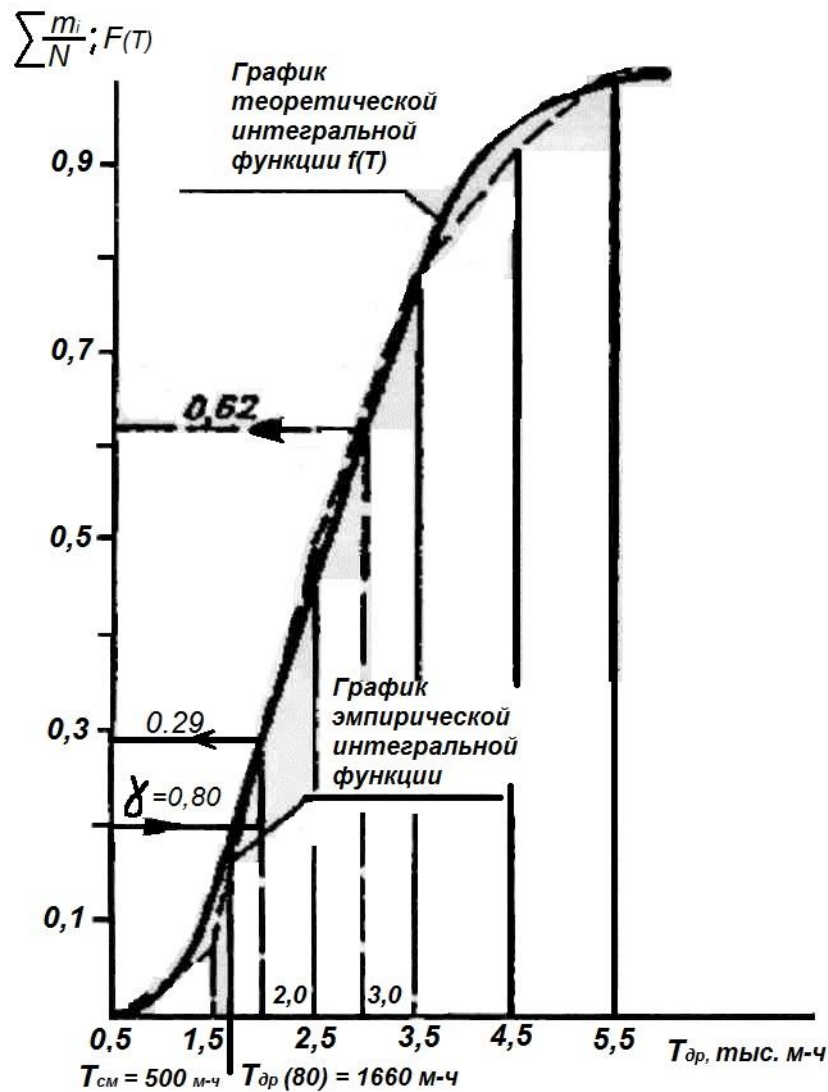


Рисунок 3.2 – Эмпирическая интегральная функция и кривая накопленных опытных вероятностей (частостей)

В примере (таблица 3.1) 1. $\frac{m_i}{N} = 0$ для $T_{др} \leq 0,5$ тыс. мото-ч. Таким образом, начальная точка ломаной линии лежит на оси абсцисс и соответствует значению $T_{др} = 0,5$ тыс. мото-ч. Частность $\frac{m_i}{N} = 0,0715$ для значений $T_{др} \leq 1,5$ тыс. мото-ч – в результате определяется вторая точка ломаной линии, которую отрезками прямой соединяют с начальной точкой, соответствующей верхней границе интервала ($\sum \frac{m_i}{N} = 0,0715 + 0,04285 = 0,5000$ для $T_{др} \leq 2,5$ тыс. мото-ч). Так, переходя последовательно от одного интервала к другому, постепенно строят график эмпирической функции распределения $T_{др}$, последняя точка которого соответствует $\sum \frac{m_i}{N} = 1,000$ для $T_{др} \leq 5,5$ тыс. мото-ч.

Определение числовых характеристик

На следующем этапе статистической обработки результатов наблюдений получают числовые характеристики распределения. Это, прежде всего среднее арифметическое значение ресурса гильзы, или просто средний ресурс $\bar{T}_{\partial p}$ - он представляет центр рассеивания значения случайной величины, вокруг которого группируются отдельные значения.

$\bar{T}_{\partial p}$ подсчитывают по следующей формуле

$$\bar{T}_{\partial p} = \sum T_{ci} \times \frac{m_i}{N}, \quad (3.6)$$

где T_{ci} – значение ресурса, соответствующего середине i -го интервала.

Степень рассеивания значений ресурса относительно $\bar{T}_{\partial p}$ оценивается – средним квадратическим отклонением σ , которое подсчитывается по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum (T_{ci} - \bar{T}_{\partial p})^2 \times \frac{m_i}{N}} \quad (3.7)$$

Или с использованием упрощенного метода сумм.

Степень рассеивания случайной величины определяется безразмерной числовой характеристикой – коэффициентом вариации

$$g = \frac{\sigma}{T_{\partial p} - t_{cm}}, \quad (3.8)$$

где t_{cm} – величина смещения зоны рассеивания $\bar{T}_{\partial p}$ относительно нулевого значения.

Смещение нужно принимать численно равным нижней границе первого частичного интервала из таблицы ряда распределения случайной величины.

Выбор теоретического закона распределения

Опытная исходная информация об изменениях случайной величины обычно представляет собой некоторую выборку из всей генеральной совокупности возможных значений случайной величины. Поэтому ряд распределения и эмпирическая интегральная функция, наряду с числовыми характеристиками распределения, содержат ошибки исходной информации. К тому же на них отражается некоторый произвол в выборе количества и границ частичных интервалов при статистической обработке опытных данных.

Однако эти ошибки можно аннулировать, если подобрать и использовать при определении показателей надежности деталей теоретический закон распределения.

Теоретический закон распределения выражает общий характер изменения показателей надежности машин и исключает частные отклонения, связанные с недостатками первичной информации. По опытному

распределению вычисляют различные показатели, которые будут характеризовать среднее значение признака и его рассеяние. Затем на основе всестороннего анализа этих данных, общих теоретических предпосылок и особенностей теоретических распределений подбирают то распределение, которое ближе всего аппроксимирует опытное распределение случайной величины. Такой процесс замены опытных закономерностей теоретическими в теории вероятностей и математической статистики называют процессом выравнивания, или сглаживания, статистической информации.

Применительно к надежности сельскохозяйственной техники используются в основном закон нормального распределения и закон распределения Вейбулла. Предварительно выбор теоретического закона распределения осуществляется по величине коэффициента вариации v .

Действительно теоретический закон распределения случайной величины может быть точно установлен лишь по данным наблюдений, включающим несколько тысяч значений исследуемой случайной величины. Однако при практических инженерных расчетах надежности изделий в большинстве случаев уже примерно известны возможные теоретические законы распределения, а окончательный выбор одного из них проводится с использованием предварительно обоснованных научными исследованиями критериями. Так, в практических заданиях выбор теоретического закона распределения ресурса гильзы может проводиться по значению коэффициента вариации:

если $v \leq 0,33$ выбирается нормальный закон распределения;

если $v \geq 0,33$ выбирается закон распределения Вейбулла.

Плотность распределения при нормальном законе распределения задают формулой

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.9)$$

где t – параметр надежности (является случайной величиной);

\bar{t} – среднее значение (математическое ожидание);

σ – среднеквадратическое отклонение;

π – постоянное число, равно 3,14;

e – натуральное число, $e = 2,71828$.

Интегральная функция распределения $F(t)$ определяется интегрированием функции плотности вероятности $f(t)$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} dt \quad (3.10)$$

Поскольку в примере $\nu = 0,472$, что больше 0,33, то принимаем теоретический закон распределения Вейбулла.

Дифференциальная функция и интегральная функция определяются

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \times e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^b} \quad (3.11)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^b}, \quad (3.12)$$

где a и b – коэффициенты закона распределения Вейбулла;

e – натуральное число, $e = 2,71828$;

t – показатель надежности.

Коэффициенты a и b для закона распределения Вейбулла находятся по таблице приложения В соответственно значению коэффициента вариации ν (метод моментов). Таким образом, $b = 2,24$, $K_b = 0,886$, $C_b = 0,418$.

Определяем коэффициент a : $a = \frac{\sigma}{C_b} = \frac{1,055}{0,418} = 2,52$ тыс. мото-ч.

Значения $f(t)$ и соответственно T_{ci} (середина частичного интервала) и $F(t)$ соответственно T_i^b (верхняя граница частичного i -го интервала) определяются из таблиц в приложении Г и Д. Определяем значения $f(t)$ и $F(t)$.

Результаты определения значений $f(t)$ и $F(t)$ представляют в виде таблицы 3.3.

Таблица 3.3 - Определение значений $f(t)$ и $F(t)$ по частичным интервалам

Частичные интервалы, тыс. мото-ч	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5
T_{ci}	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
T_{ci}/a	0,198	0,595	0,995	1,390	1,786
$a \times f(t)$	0,318	0,815	0,828	0,388	0,122
$f(t)$	0,126	0,335	0,328	0,151	0,048
T_i^b	1	2	3	4	5
T_i^b/a	0,397	0,793	1,190	1,587	1,984
$F(t)$	0,122	0,455	0,773	0,942	0,990

Значения $f(t)$ и $F(t)$ из таблиц в приложениях Г и Д используются для построения графиков соответствующих функций в тех же осях координат, что и эмпирическая интегральная функция распределения. Дифференциальная функция $f(t)$ строится на рисунке 3.1, причем расчетные значения $f(t)$ соответствуют серединам частичных интервалов, а теоретическая интегральная функция – на рисунке 3.2, где расчетные значения $F(t)$ соответствуют верхним границам частичных интервалов.

По графику теоретической интегральной функции распределения можно установить γ – процентный ресурс гильзы и определить вероятность

такого события, что ресурс гильзы будет находиться в некоторых пределах. Например, 80 % гамма ресурс (рисунок 3.2) для гильзы цилиндров двигателя ЯМЗ-238 в условиях наблюдения составил 1660 мото-ч. Это означает, что 20 % гильз к моменту достижения наработки 1660 мото-ч исчерпают свой ресурс, а 80 % гильз останутся работоспособными и их T_{op} превысит 1660 мото-ч.

По графику $F(t)$ (рисунок 3.2) можно определить вероятность события, что гильза до ремонта проработает не менее 2000 мото-ч, но не более 3000 мото-ч, т.е., что T_{op} гильзы будет находиться в пределах от 2000 до 3000 мото-ч. Из рисунка 3.2 видно, что для примера $P(2000 \leq T_{op} \leq 3000) = 0,62 - 0,29 = 0,33$. следовательно, треть гильз будет нуждаться в ремонте после наработки от 2000 до 3000 мото-ч.

Окончательный выбор теоретического закона распределения по доремонтным ресурсам гильз цилиндров двигателя ЯМЗ-238 выполняют с помощью критерия согласия. Применительно к показателям надежности сельскохозяйственной техники чаще всего используют критерий Пирсона χ^2 и критерий Колмогорова λ . По величине критерия согласия можно определить вероятность совпадения опытных и теоретических законов и на этом основании принять или отбросить выбранный теоретический закон из двух или нескольких. Следует помнить, что критической вероятностью совпадения принято считать $P = 0,1$. Если $P < 0,1$, то выбранный для выравнивания опытной информации теоретический закон распределения следует считать недействительным.

Критерий Пирсона дает более точную вероятность совпадения опытного и теоретического законов распределения, но он и сложен в расчетах. Критерий Колмогорова прост в определении, но дает, как правило, завышенную вероятность совпадения. Однако при выборе одного закона из двух или нескольких, когда важно оценить какой из них лучше выравнивает опытную информацию, можно пользоваться критерием Колмогорова. Критерий согласия Колмогорова определяют по формуле:

$$\lambda = D_{\max} \sqrt{N}, \quad (3.13)$$

где D_{\max} – максимальная абсолютная разность между накопленной опытной вероятностью и теоретической интегральной функцией распределения, то есть

$$D_{\max} = \max \left| \sum_{i=1}^n P_i - F(T_{gi}) \right| \quad (3.14)$$

Разницу между опытным и теоретическим значениями функций определяют для каждого интервала. Выбрав окончательно теоретический закон распределения, наносим его на график (рисунок 3.2).

Определение доверительных границ рассеяния

Нахождение среднего ресурса гильзы заключается в отыскании центра рассеивания распределения, относительно которого группируются отдельные значения ресурса, установленные за 70-ю гильзами цилиндров двигателя ЯМЗ-238. Центр рассеивания может быть определен некоторым числом – средним арифметическим значением, которое уже известно (это является точечной оценкой среднего ресурса гильзы), или может быть указан интервал значений ресурса (верхняя и нижняя границы), который с некоторой доверительной вероятностью, или достоверностью, включает в себя центр рассеивания ресурса как случайной величины – последнее является интервальной оценкой $T_{\partial p}$.

Определение относительной ошибки расчета

Преимущество интервальной оценки состоит в том, что получают результат с наперед заданной достоверностью. В расчетах достаточно провести оценку с доверительной вероятностью $\alpha = 0,80$. При необходимости получить результат с большей достоверностью принимают $\alpha = 0,90 \dots 0,95$.

Второе преимущество интервальной оценки – возможность определения наибольшей относительной погрешности расчета $\pm e_{\alpha}$, которая подсчитывается по формулам:

$$+ e_{\alpha} = \frac{\bar{T}_{\partial p}^{\epsilon} - \bar{T}_{\partial p}}{\bar{T}_{\partial p}}, \quad (3.15)$$

$$- e_{\alpha} = \frac{\bar{T}_{\partial p}^{\eta} - \bar{T}_{\partial p}}{\bar{T}_{\partial p}}, \quad (3.16)$$

где $\bar{T}_{\partial p}^{\epsilon}$ и $\bar{T}_{\partial p}^{\eta}$ – верхняя и нижняя границы доверительного интервала среднего значения ресурса.

В соответствии с законом распределения Вейбулла доверительные границы среднего значения определяют следующим образом:

$$\bar{T}_{\partial p}^{\epsilon} = \bar{T}_{\partial p} \sqrt[\epsilon]{r_1}; \quad \bar{T}_{\partial p}^{\eta} = \bar{T}_{\partial p} \sqrt[\epsilon]{r_3}, \quad (3.17)$$

где ϵ – параметр распределения Вейбулла;

r_1 и r_3 – коэффициенты, устанавливаемые по таблице (приложение Е) соответственно объему наблюдений N и принятой доверительной вероятности.

Для рассматриваемого примера $N = 70$, при $\alpha_1 = 0,80$ коэффициенты $r_1 = 1,11$ и $r_3 = 0,905$; а при $\alpha_2 = 0,95$ коэффициенты $r_1 = 1,23$ и $r_3 = 0,83$. Тогда $\overline{T_{dp\alpha=0,80}^6} = 2,74^{2,24}\sqrt[4]{1,11} = 2,74 \times 1,048 = 2,87$ тыс. мото-ч.

$$\text{и } \overline{T_{dp\alpha=0,80}^H} = 2,74^{2,24}\sqrt[4]{0,905} = 2,74 \times 0,9554 = 2,62 \text{ тыс. мото-ч.}$$

При $\alpha_2 = 0,95$ верхняя граница доверительного интервала $\overline{T_{dp\alpha=0,95}^6} = 2,74^{2,24}\sqrt[4]{1,23} = 2,74 \times 1,096 = 3,00$ тыс. мото-ч и нижняя граница доверительного интервала $\overline{T_{dp\alpha=0,95}^H} = 2,74^{2,24}\sqrt[4]{0,83} = 2,74 \times 0,9202 = 2,52$ тыс. мото-ч.

Таким образом, с доверительной вероятностью $\alpha = 0,80$ можно утверждать, что $\overline{T_{dp}}$ заключен в интервале от 2,62 до 2,87 тыс. мото-ч. При повышении достоверности результатов расчета среднего значения случайной величины границы доверительного интервала расширяются. При $\alpha = 0,95$ средний ресурс $\overline{T_{dp}}$ заключен в интервале от 2,52 до 3,00 тыс. мото-ч.

В заключении расчета определяется наибольшая возможная относительная погрешность среднего значения ресурса:

$$\begin{aligned} +e_{\alpha=0,80} &= \frac{2,87 - 2,74}{2,74} = 0,0486; \\ -e_{\alpha=0,80} &= \frac{2,62 - 2,74}{2,74} = -0,0437; \\ +e_{\alpha=0,95} &= \frac{3,00 - 2,74}{2,74} = 0,0948; \\ -e_{\alpha=0,95} &= \frac{2,52 - 2,74}{2,74} = -0,0803. \end{aligned}$$

Следовательно, проводя интегральную оценку среднего значения ресурса с большей достоверностью, получают результат с меньшей точностью, т.е. с большей относительной погрешностью.

Для удобства расчета относительную ошибку δ определяют в процентах от среднего значения показателя надежности независимо от закона распределения:

$$\delta = \frac{\overline{T_{dp\alpha}^6} - \overline{T_{dp}}}{\overline{T_{dp}} - t_{cm}} \times 100\%$$

где t_{cm} – смещение статистического ряда.

Контрольные вопросы

- 1 Составление статистического ряда.
- 2 Как определить протяженность интервала статистического ряда.
- 3 Определить числовые характеристики опытной информации.
- 4 Проверка информации на наличие выпадающих точек.

5 Выбор теоретического закона распределения показателей надежности по данным опытной информации.

6 Определить доверительные границы рассеяния опытной информации.

Литература

1 Пучин Е.А. и др. Надежность технических систем – М : УМЦ «Триада». 2005. – 353 с.

2 Курчаткин В. В. и др. Надежность и ремонт машин – М. : Колос, 2000. - 776 с.

3 Шишкин Г. М. Теоретические основы надежности и ремонта сельскохозяйственной техники / Г. М. Шишкин. – Иркутск : ИрГСХА, 2005. - 1060 с.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОГО РЕСУРСА СОЕДИНЕНИЯ И ДОПУСТИМЫХ ИЗНОСОВ БЕЗ РЕМОНТА РАЗМЕРОВ СОЕДИНЯЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Цели работы

- 1 Изучить теоретические основы проведения дефектации деталей и соединений.
- 2 Ознакомиться со схемой расчета ресурсов, предельных и допустимых износов деталей соединения.
- 3 Приобрести навыки определения полного ресурса деталей и допустимых размеров соединяемых деталей.

Теоретические сведения

Полный ресурс детали или соединения – наработка от начала эксплуатации и до списания. Полный ресурс деталей или соединений ограничивается предельным состоянием.

Предельное состояние – состояние машины или ее элемента, при котором дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление ее работоспособности невозможно или нецелесообразно в результате достижения предельного состояния эксплуатации машины, нарушения безопасности, или её неустранимого изменения заданных параметров, обуславливающих экономичную целесообразность списания детали.

Дефектация – контроль технического состояния деталей и узлов при ремонте машин – является одним из важнейших этапов технологического процесса. Производится на специальных рабочих местах, оснащенных необходимыми комплектами приборов и инструментов.

Контроль деталей проводится на основании “технических требований на капитальный ремонт” обязательных для ремонтных предприятий.

Среднюю скорость изнашивания детали по данным проведенных измерений вычисляют по формуле

$$\overline{W}_I = \frac{U_{изм}}{T_{изм}}, \quad (4.1)$$

где $U_{изм}$ - износ детали на момент измерения, мм;

$T_{изм}$ - ресурс детали на момент измерения, мото-ч.

Среднюю скорость изнашивания соединения вычисляют по формуле:

$$\overline{W}_c = \frac{S_{изм} - S_{н. max}}{T_{изм}}, \quad (4.2)$$

где $S_{изм}$ – измеренная величина зазора в соединении, мм вычисляют по формуле

$$S_{изм} = D_{изм} - d_{изм} \quad (4.3)$$

$S_{н.маx}$ – начальный зазор в соединении из технических требований на ремонт соединения в соответствии с таблицей 4.1, мм.

Таблица 4.1 - Данные из технических требований на ремонт соединения “поршневой палец – втулка шатуна”

Соединяемые детали	Размеры деталей, мм	Зазор в соединении, мм		
	Начальный диаметр	Начальный S_n	Допустимый $S_{др}$	Предельный $S_{пр}$
Втулка	$42^{+0.038}_{+0.023}$	От 0,022 До 0,047	0,15	0,25
Поршневой палец	$42^{+0.001}_{-0.009}$			

Средний остаточный ресурс соединения вычисляют по формуле:

$$\bar{T}_{co} = \frac{S_{пр} - S_{изм}}{W_c}, \quad (4.4)$$

где $S_{пр}$ – предельный зазор в соединении из технических условий на дефектацию соединения в соответствии с таблицей 4.1, мм.

Доверительные границы среднего остаточного ресурса (T_{co}) соединения вычисляют по формулам:

$$T_{oc}^H = 0,70 T_{co}; \quad (4.5)$$

$$T_{oc}^B = 1,35 T_{co} \quad (4.6)$$

По данным технической документации, полный средний ресурс детали соединения в соответствии с рисунком 4.1 вычисляют по формулам:

$$\bar{T}_{\partial n} = \frac{I_{np}}{I_{np} - I_{\partial p}} \bar{T}_{mp} \quad (4.7)$$

$$\bar{T}_{cn} = \frac{S_{np} - S_{Hmax}}{S_{np} - S_{\partial p}} \bar{T}_{mp} \quad (4.8)$$

где $I_{пр}$ и $I_{др}$ - соответственно предельный и допустимый износы, мм;
 S_{Hmax} , $S_{пр}$ и $S_{др}$ - соответственно начальный максимальный, предельный и допустимый зазоры из технических требований на ремонт соединения в соответствии с рисунком мм;

T_{mp} - установленная величина межремонтного ресурса, мото-ч
 Предельный износ вычисляют по формуле:

$$I_{np} = I_{\partial p} \frac{S_{np} - S_{Hmax}}{S_{np} - S_{\partial p}} \quad (4.9)$$

Предельные размеры втулки и поршневого пальца вычисляют по формулам:

$$\text{втулка } D_{\text{пр}} = D_{\text{н.маx}} + I_{\text{пр}}, \quad (4.10)$$

$$\text{поршневой палец } d_{\text{пр}} = d_{\text{н.мин}} - I_{\text{пр}} \quad (4.11)$$

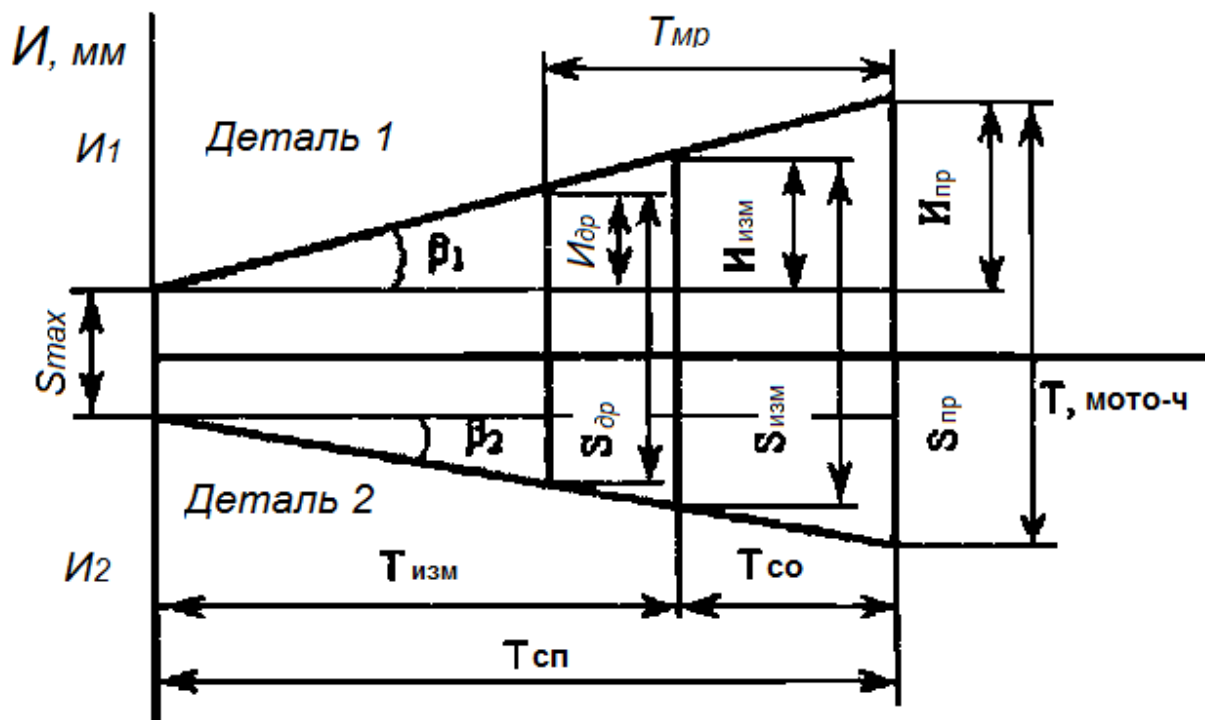


Рисунок 4.1 - Схема расчета среднего полного ресурса соединения, предельных и допустимых износов деталей

Допустимые без ремонта размеры втулки и поршневого пальца, вычисляют по формулам:

$$\text{втулка } D_{\text{др}} = D_{\text{маx}} + T_{\text{мр}} \times W_{\text{вт}}, \quad (4.12)$$

$$\text{поршневой палец } d_{\text{др}} = d_{\text{мин}} - T_{\text{мр}} \times W_{\text{пп}}. \quad (4.13)$$

Допустимые износы втулки и поршневого пальца вычисляют по формулам:

$$\text{втулка } I_{\text{др}} = D_{\text{др}} - D_{\text{н.маx}}, \quad (4.14)$$

$$\text{поршневой палец } I_{\text{др}} = d_{\text{н.мин}} - d_{\text{др}}. \quad (4.15)$$

Пример расчета полного ресурса соединения

Измерением соединения “поршневой палец-втулка шатуна”, проведенным через заданную наработку $T_{\text{изм}} = 2420$ мото-ч. двигателя

СМД-14, определены диаметры втулки верхней головки шатуна и поршневого пальца в местах их наибольшего износа: $D_{изм} = 42,05$ мм; $d_{изм} = 41,95$ мм.

Межремонтный ресурс $T_{мр} = 4800$ мото-ч.

Требуется определить остаточный ресурс соединения, доверительные границы при $\beta = 0,80$, предельные и допустимые при ремонте размеры втулки и поршневого пальца.

1 Среднюю скорость изнашивания соединения вычисляют по формуле

$$\overline{W}_c = \frac{(42,05 - 41,95) - 0,047}{2420} = 2 \times 10^{-5} \text{ мм/мото-ч}$$

2 Средний остаточный ресурс соединения вычисляют по формуле

$$\overline{T}_{co} = \frac{0,25 - 0,1}{2 \times 10^{-5}} = 7500 \text{ мото-ч}$$

3 Доверительные границы остаточного ресурса соединения вычисляют по формулам (4.5) и (4.6)

$$T_{co}^H = 0,70 \times 7500 = 5250 \text{ мото-ч}$$

$$T_{co}^B = 1,35 \times 7500 = 10125 \text{ мото-ч}$$

4 Полный ресурс соединения в соответствии с техническими требованиями (табл. 4.1) вычисляют по формуле (4.8):

$$\overline{T}_{cn} = \frac{4800(0,25 - 0,047)}{0,25 - 0,15} = 9744 \text{ мото-ч}$$

5 Среднюю скорость изнашивания втулки и поршневого пальца вычисляют по формуле (4.1):

$$\text{втулка: } \overline{W}_{вт} = \frac{42,05 - 42,038}{2420} = 0,5 \times 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{мото-ч}}$$

$$\text{поршневой палец: } \overline{W}_{пн} = \frac{41,991 - 41,95}{2420} = 1,7 \times 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{мото-ч}}$$

6 Допустимые без ремонта размеры деталей соединения вычисляют по формулам (4.10) и (4.11):

$$\text{втулка: } D_{др} = 42,038 + 4800 \times 0,5 \times 10^{-5} = 42,06 \text{ мм}$$

$$\text{поршневой палец: } d_{др} = 41,991 - 4800 \times 1,7 \times 10^{-5} = 41,91 \text{ мм}$$

7 Допустимые износы втулки и поршневого пальца по техническим условиям вычисляют по формулам:

$$\text{втулка: } I_{др} = 42,06 - 42,038 = 0,02 \text{ мм}$$

$$\text{поршневой палец: } I_{др} = 41,991 - 41,91 = 0,08 \text{ мм}$$

8 Предельные износы втулки и поршневого пальца в соответствии с таблицей 4.1 вычисляют по формуле (4.9):

втулка
$$I_{np} = 0,02 \frac{0,25 - 0,047}{0,25 - 0,1} = 0,4 \text{ мм}$$

поршневой палец
$$I_{np} = 0,08 \frac{0,25 - 0,047}{0,25 - 0,10} = 0,16 \text{ мм}$$

9 Предельные размеры втулки и поршневого пальца вычисляются по формулам (4.10) и (4.11):

втулка $D_{пр} = 42,038 + 0,04 = 42,078 \text{ мм}$

поршневой палец $d_{пр} = 41,991 - 0,16 = 41,831 \text{ мм}$

Значения измерений для выполнения расчетов полного ресурса соединения и допустимых без ремонта размеров, соединяемых деталей приведены в приложении 3.

Порядок выполнения работы

- 1 Получить детали соединения.
- 2 Из технических требований на ремонт определить:
 - размер детали по чертежу
 - начальный зазор;
 - допустимый зазор;
 - предельный зазор.
- 3 Установить наработку соединения на момент измерения деталей.
- 4 Выполнить расчеты.
- 5 Вычертить расчетную схему изнашивания деталей соединения.
- 6 Оформить отчет по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое технический ресурс изделия?
- 2 Что такое предельное состояние детали?
- 3 Что такое дефектация?
- 4 Как определить полный ресурс соединения.
- 5 Методика определения допустимых без ремонта размеров деталей соединения?

Литература

- 1 Курчаткин В. В., Тельнов Н. Ф., Ачкасов, Башишев А.Н. и др. Надежность и ремонт машин – М : Колос, 2000. – 776 с.
- 2 Варнаков В.В., Стрельцов В.В., Попов В.Н., Карпенков В.Ф. Технический сервис машин с/х назначения – М. : Колос, 2003. – 292 с.