ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МАШИН И ДЕТАЛЕЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ИЗНАШИВАНИЮ

РД 50-423—83

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
1984

gost.e-ecolog.ru

РАЗРАБОТАНЫ Государственным комитетом СССР по стандартам Министерством высшего и среднего образования СССР Министерством автомобильной промышленности

ИСПОЛНИТЕЛИ:

Л. А. Лейфер, А. И. Илларионов, С. В. Беличков, Л. Н. Евстафьева, И. Б. Гурвич, В. И. Чумак, А. П. Егорова

ВНЕСЕНЫ Государственным комитетом СССР по стандартам

Член Госстандарта В. Н. Шахурин

УТВЕРЖДЕНЫ И ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 6 сентября 1983 г. № 4797

РУКОВОДЯЩИЙ НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Надежность в технике. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей, подверженных изнашиванию

РД 50-423—83

Введены впервые

Утверждены Постановлением Госстандарта от 6 сентября 1983 г. № 4797, срок введения в действие установлен с 1 января 1985 г.

Методические указания распространяются на изделия, подверженные изнашиванию, отказы которых вызваны процессами изнашивания контролируемых поверхностей трущихся пар, и устанавливают методы расчета остаточного ресурса, дисперсии остаточного ресурса и вероятности безотказной работы.

В методических указаниях рассматриваются методы оценивания остаточного ресурса в условиях основных типовых ситуаций, которые возникают при испытаниях и эксплуатации и отличаются объемом и видом исходной информации.

Методические указания предназначены для разработки методов оценивания параметрической надежности конкретных изделий.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Величина остаточного ресурса изделия определяется временем наступления предельного состояния испытываемого изделия после выработки им части ресурса.

1.2. Прогнозирование остаточного ресурса основано на возможности наблюдения и измерения изменяющихся в процессе эксплуатации или испытаний параметров технического состояния изделия.

1.3. Номенклатура контролируемых параметров, которые определяют остаточный ресурс, устанавливается в отраслевой нормативно-технической документации.

1.4. Для каждого контролируемого параметра должна быть задана область предельных значений, выход за пределы которой определяет ресурс изделия.

1.5. Прогнозирование остаточного ресурса осуществляется в предположении единого на всем рассматриваемом интервале времени механизма изменения каждого контролируемого параметра.

Измерения контролируемых параметров, полученные при действии разных механизмов изменения, не должны совместно обра-

© Издательство стандартов, 1984

батываться. В частности, измерения, полученные до окончания приработки, должны быть исключены из обработки.

1.6. Требования п. 1.5 не исключают для повышения точности прогноза использовать результаты измерений контролируемых параметров в форсированных режимах. При этом необходимо знание функции, позволяющей пересчитывать результаты измерения из одного режима в другой.

1.7. Вид контролируемых параметров, количество возможных измерений в нормальных и других режимах, зависимости характеристик от параметров режима эксплуатации или испытаний, от параметров материалов в геометрических размерах, а также другая априорная информация формирует ту или иную типовую ситуацию при определении остаточного ресурса.

1.8. Структура основных признаков типовых ситуаций, возникающих при испытаниях или эксплуатации изделий, ресурсные отказы которых формируются механизмами изнашивания, систематизация и шифры приведены в табл. 1.

1.9. Согласно табл. 1 шифр любой ситуации четырехзначный, порядковый знак может принимать значения 1, 2, 3, 4.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ТИПОВЫХ СИТУАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

2.1. Наиболее типичные ситуации, возникающие при оценивании остаточного ресурса изделий, отказы которых обусловлены изнашиванием, даны в табл. 2. Типовые ситуации группы 1113 вынесены в отдельную таблицу (см. табл. 3).

2.2. Как следует из табл. 2, 3, типовая ситуация формируется в зависимости от объема текущей информации об изделии, остаточный ресурс которого оценивается (результаты непосредственного измерения контролируемых параметров), и априорной информации (информации о результатах ранее проводимых испытаний в тех же или других режимах и другая).

3. МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

3.1. Систематизация методов оценивания остаточного ресурса, дисперсии остаточного ресурса и вероятности безотказной работы для основных типовых ситуаций представлена в табл. 3.

3.2. Пример расчета остаточного ресурса приведен в приложении 2.

Теоретическое обоснование в приложении 3.

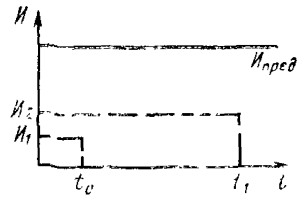
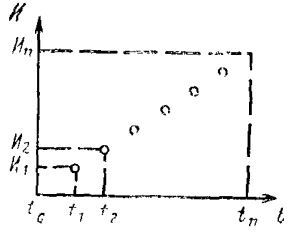
Таблица 1

Структура основных признаков типовых ситуаций и шифр ситуаций

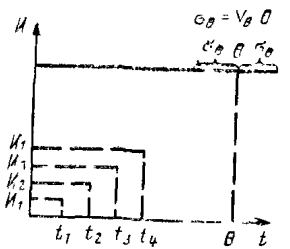
Признак и его порядковый номер в шифре	Описание признаков и его число в порядковом номере
1. Прямой или косвенный контролируемый параметр	1. Прямое измерение размеров изнашивающихся поверхностей или величин износа (прямой параметр). 2. Измерение величин, связанных с параметрами износа статистической или функциональной зависимостью (косвенный параметр)
2. Количество контролируемых параметров	1. Один. 2. Больше одного
3. Взаимосвязь между контролируемыми параметрами	1. Независимость. 2. Статистическая зависимость. 3. Регрессионная зависимость между некоторыми прямыми и косвенными параметрами
4. Наличие информации об испытаниях или эксплуатации в других режимах или аналогичных изделий, информации о расчетных зависимостях между параметрами износа и параметрами режимов, микрогеометрии, условий контактирования	1. Информация отсутствует. 2. Информация о коэффициентах вариации ресурса или скорости изнашивания. 3. Зависимость параметров изнашивания от параметров режимов испытаний или эксплуатации параметров материалов, параметров размеров. Информация о точности задания параметров. 4. Информация о ресурсах изделий, испытанных или эксплуатируемых в других режимах, а также функции, позволяющие пересчитывать значения ресурса из одного режима в другой. 5. Информация об измерениях контролируемого параметра в других режимах

Таблица 2

Характеристика типовых ситуаций

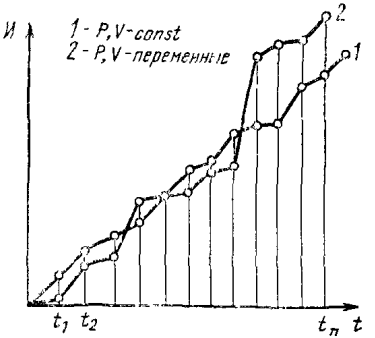
Номер п п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
1	1.1.1.1	Стендовые испытания двигателя. Перед испытаниями и после испытаний продолжительностью $T_{И}$ произвели замеры диаметра втулки и рабочего цилиндра. Метод измерений — микрометрирование, что связано с разборкой агрегата, поэтому удается фиксировать лишь конечное и начальное состояние	
2	1.1.1.1	Испытания почвообрабатывающих машин. В течение всего времени испытаний производится систематическое измерение размеров режущей части рабочего органа (лемехов, отвалов у плугов, зубьев или дисков у борон, лап у культиваторов)	

Продолжение табл 2

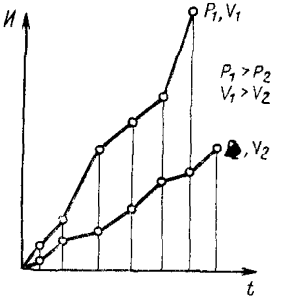
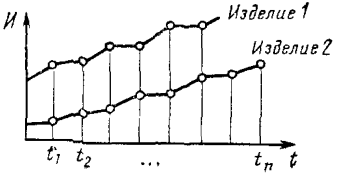
Номер п п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
3	1 1.1 2	Испытания режущего инструмента (сверла, метчики, токарные резцы) В процессе испытаний может быть произведено от двух и более измерений размеров режущей части. До испытаний известны коэффициенты вариации V_Θ ресурса, например, [13]	

Наименование инструмента	V_Θ
Сверла из быстрорежущей стали с диаметрами, мм:	
менее 3,175	0,62 ÷ 1,54
3,175 ÷ 12,7	0,2 ÷ 0,35
Метчики	0,7 ÷ 1,18
Токарные резцы из быстрорежущей стали	0,14 ÷ 0,35
Токарные резцы с твердосплавной головкой	0,22 ÷ 0,5
Строгальные резцы	0,05 ÷ 0,12
Фасонные резцы из быстрорежущей стали	0,3 ÷ 0,55
Фасонные резцы с твердосплавной головкой	0,27 ÷ 0,31

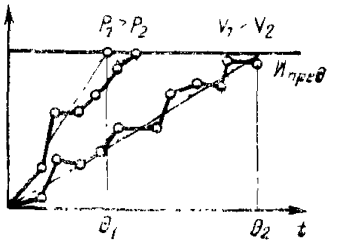
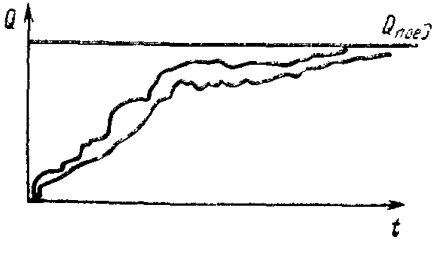
Продолжение табл. 2

Номер п/п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
4	1.1.1.2	Испытания почвообрабатывающих машин, изготовленных так, что после окончания приработки качество всех изделий однородно. Известен коэффициент вариации скорости изнашивания V_v. Например, при случайных колебаниях параметра, определяющих режим испытаний (давления на рабочий орган P и скорость относительного перемещения частиц по поверхности рабочего органа $v_{отн}$), коэффициент вариации V_v рассчитывается по формуле $V_v = (V_P^2 + V_{v_{отн}}^2)^{1/2}$, где V_P, $V_{v\ отн}$ — соответственно, коэффициенты вариации давления и относительной скорости	

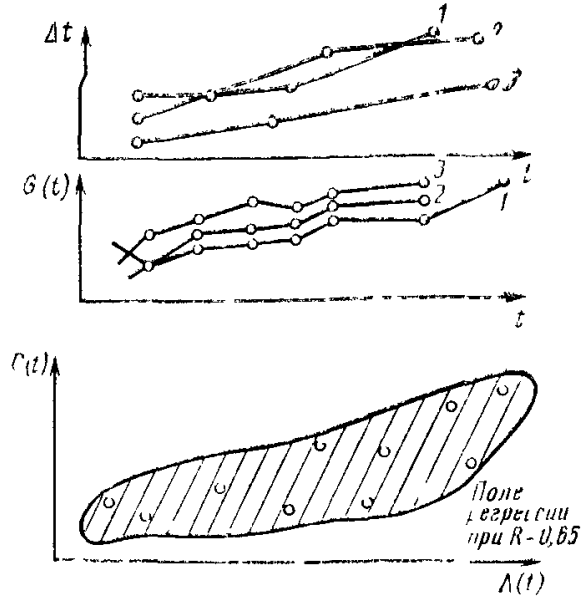
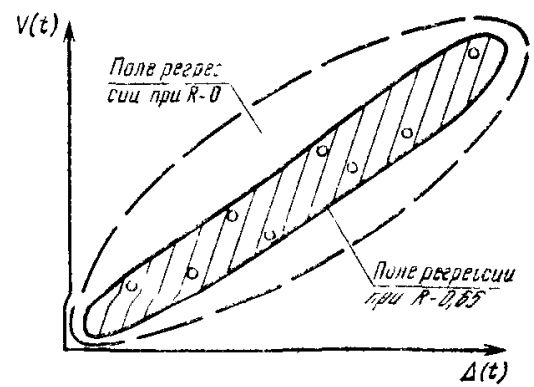
Продолжение табл. 2

Номер п/п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
5	1.1.1.3	Испытываются на ресурс режущие части ножа бульдозера. *Известно [4], что интенсивность изнашивания* режущих частей ножа связана с параметрами, определяющими режим испытаний следующей зависимостью $$I=k_a \cdot P \cdot v,$$ где P — удельное давление на трущиеся поверхности; v — средняя скорость перемещения поверхности; k_a — коэффициент абразивности грунтов. Величина P рассчитывается по формуле $$P=k_1 \cdot \frac{G_a}{B_a},$$ где G_a — масса навесного оборудования; B — ширина отвала; a — ширина задней грани ножа	
6	1.1.1.3	В условиях предыдущего примера качество изготовления или начальное состояние после приработки неоднородно. Известен коэффициент вариации параметра, определяющего неоднородность качества, в рассматриваемом примере размеры трущихся пар у разных изделий	

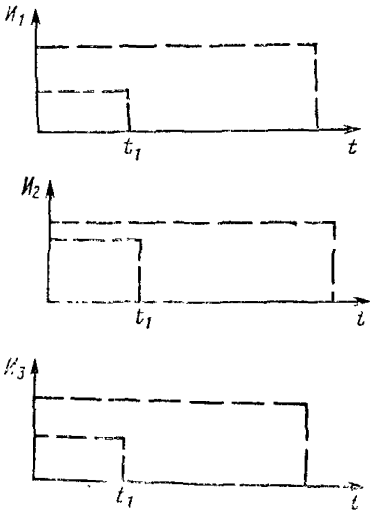
Продолжение табл. 2

Номер п/п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
7	1.1.1.4	Испытываются насосные установки в различных режимах, определяющие параметры которых давление P и частота вращения n. Ресурсы в разных режимах Θ_1, Θ_2 связаны соотношением [3] $$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{\beta},$$ для горных гидромашин $\alpha \sim 10/3$, $\beta \sim 1$. Испытываются открытые передачи сельхозтехники в разных режимах, определяющие параметры которых давление P и скорость v. В условиях одинаковой износостойкости материала и изнашивающей способности воздушно-абразивной среды ресурсы в разных режимах Θ_1, Θ_2 связаны соотношением [9] $$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0,33} \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1,135}$$	
8	2.1.1.1	Стендовые испытания гидроцилиндров. Контролируемый параметр — величина утечки через внутреннее уплотнение	

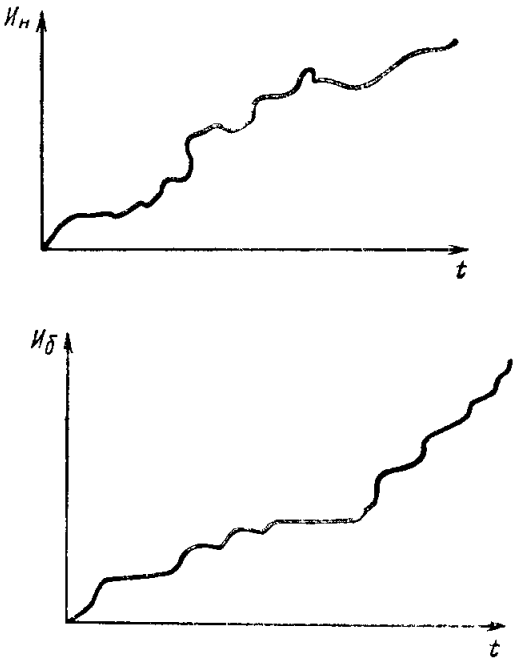
Продолжение табл 2

Номер п п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
9	2.2.3.1	Стендовые испытания двигателя ГАЗ-66. Анализируются результаты измерения в процессе испытаний величины износа одного из рабочих элементов цилиндро-поршневой группы Δ и величины угара масла G. Анализ результатов измерений Δ и G показал, что Δ и G изменяются во времени t по линейному закону, было найдено поле регрессии между Δ и G, определяющее возможные отклонения износа Δ при фиксированном значении G. Статистическую связь по располагаемому материалу выявить не удалось	
10	2.2.2.1	Стендовые испытания двигателя ГАЗ-66. Анализируются результаты измерений в процессе испытаний величины износа одного из рабочих элементов цилиндро-поршневой группы Δ и величины пропуска газов V. Анализ результатов измерений показал, что Δ и V в один и тот же момент времени статистически связаны. Коэффициент корреляции составляет $R_{V\Delta}=0{,}65.$	

Продолжение табл. 2

Номер п/п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
11	1.2.1.1	Стендовые испытания двигателя ГАЗ-51. Перед испытаниями и после испытаний продолжительностью $T_И$ производятся замеры элементов цилиндро-поршневой группы: диаметр втулки рабочего цилиндра; глубина канавки поршня; высота поршневого кольца. Метод измерения — микрометрирование, что связано с разборкой агрегата, поэтому удается фиксировать лишь конечное и начальное состояние	

Продолжение табл. 2

Номер п/п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
12	1 2.1.3	Испытывается тормозное устройство автомобиля. Контролируется величина изнашивания тормозных накладок и барабанов Известно, [4], что интенсивности изнашивания накладок $I_н$ и барабанов $I_б$ для ГАЗ-51, эксплуатируемых в условиях средней полосы, зависят от среднего удельного давления на поверхность трения P и средней скорости по поверхности трения $\overline{v}$ и рассчитываются по формулам: $I_н = k_1 \cdot P^{0,8} v = 0{,}57 \cdot P^{0,8} \cdot v,$ $I_б = k_2 \cdot P^{0,8} v = 0{,}62 \cdot P^{0,8} \cdot v.$ Для горных условий: $I_н = k_1^* \cdot P^{0,8} \cdot v = 0{,}75 \cdot P^{0,8} \cdot v,$ $I_б = k_2^* \cdot P^{0,8} \cdot v = 0{,}089 \cdot P^{0,8} \cdot v.$ Известны результаты измерения износов элементов тормозного устройства в различные моменты при разных режимах. Флюктуации P и V в одном режиме значительно меньше разности средних значений P и V для разных режимов. Качество изготовления однородно	

Продолжение табл. 2

Номер п/п	Шифр ситуации	Пример ситуации	Вид экспериментальных данных
13	222.1	Стендовые испытания двигателя ГАЗ-66. Анализируются результаты измерений в процессе испытаний величин износов одного из рабочих элементов цилиндро-поршневой группы Δ, величины расхода масла G, пропуска газов в картер V. Анализ результатов измерений показал, что между V и Δ имеется корреляционная связь в совпадающие моменты времени (коэффициент корреляции $R_{G\Delta}$ равен 0,65) Между Δ и G корреляция отсутствует	

Таблица 3

Характеристика типовых ситуаций группы 1113

Типовой узел изнашивания	Расчетные соотношения для скорости изнашивания V	Характеристика экспериментальных данных
1. Тяжелонагруженные пары качения, работающие в условиях абразивного изнашивания (зубчатые, фрикционные передачи, подшипники качения)	$V=4\cdot10^{2}\cdot\frac{A\cdot k}{M}$, [5, 12] где A — отражает условия абразивного воздействия $A=q_a^{2/3}\cdot R^{0,5}\cdot\sigma^{2,5}$; q_a — концентрация абразивных примесей в воздухе или масле, %; R — средний радиус абразивных частиц, мм; σ — предел прочности, кгс/мм^2; M — отражает условия физико-механических свойств материала $M=\delta^{t}HB_1^{1,5}\cdot HB_2$; δ — характеристика пластичности поверхностных слоев, %; t — коэффициент контактно-фрикционной усталостности; HB_1, HB_2 — твердость по Бринеллю трущихся поверхностей; k — отражает условия геометрических и кинематических сопряжений $k=\sqrt{R'}\,\frac{v_1-v_2}{\alpha V_1+\beta V_2}\cdot n$; R' — приведенный радиус кривизны сопрягаемых поверхностей; v_1, v_2 — скорости скольжения сопрягаемых поверхностей; n — число нагружений в единицу времени	1. Разброс значений основных параметров, определяющих режимы работы, условия контактирования физико-механические характеристики изнашиваемых поверхностей рассматриваемого изделия. Разброс определяется неточностью фиксации параметров для рассматриваемого изделия. 2. Количество измерений величины износа. 3. Общий вид зависимости параметров, определяющих режимы работы или условия контактирования во времени: V — const, I — пропорционально t^{ν}

Продолжение табл. 3

Типовой узел изнашивания	Расчетные соотношения для скорости изнашивания V	Характеристика экспериментальных данных
2 Зубчатые пары	$$v = k \cdot \frac{n z_s M \cdot E^{t/2-1}}{l \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \left(\frac{\sigma}{f}\right)^t}, \quad [12]$$ где n — число оборотов в ед. времени; z_s — число пар зацепления; l — длина контактных линий; M — вращающий момент; E — модуль Юнга; f — коэффициент трения; k — коэффициент, зависящий от вида зубчатой передачи и экспериментальных данных; α, β — углы зацепления	
3. Подшипник качения	$$V = \frac{k \cdot R' z}{2\pi R \varkappa E (f \cdot l \cdot \delta)^{t+r}} \cdot v,$$ где R' — приведенный радиус; $\varkappa$ — жесткость зоны контакта; δ — ширина площади контакта; R — радиус дорожки трения, z — число одновременно контактирующих шариков; v — средняя скорость скольжения	
4. Подшипник скольжения	$$v(n) = k \cdot P(n)^m \cdot a(n) \cdot \dot{\bar{v}},$$ где k, m — коэффициенты, определяемые экспериментально, $P(n)$ — давление на n-м обороте $$P(n, x) = P_m(n) \sqrt{1 + \left(\frac{x}{a(n)}\right)^2},$$ $a(n)$ — полуширина площади контакта	

Продолжение табл. 3

Типовой узел изнашивания	Расчетные соотношения для скорости изнашивания V	Характеристика экспериментальных данных
5. Детали передач гибкими элементами *Шкивы*	$$v = I \cdot \frac{2\pi}{f} R\psi \left(1 + \frac{\psi^2}{3}\right)^n,$$ где R — радиус шкива; ψ — коэффициент тяги; f — коэффициент трения; n — число оборотов в единицу времени; I — интенсивность изнашивания $$I = k \cdot P^{t,5+1} \cdot E^{4\,5\,t-1} \cdot \Delta^{2\,5\,t} \left(\frac{kf}{\sigma_0}\right)^t;$$ k — коэффициент; P — давление; E — модуль Юнга; Δ — микрогеометрический комплекс	
6. Цепные передачи	$$V = kP^m \overline{V},\ m \approx 1,$$ где k, m — коэффициенты, определяемые экспериментально; V — средняя скорость скольжения	
7. Конвейерные ленты	$$I = k_1 \cdot P^{1+k_2 t} \cdot E^{k_3 t-1} \left(\frac{f}{\sigma_0}\right)^t \cdot \overline{v}$$ где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты, определяемые экспериментально (например, для железной руды $k_1 = 0{,}92$; $k_2 = 0{,}11$; $k_3 = 0{,}89$); $\overline{v}$ — средняя скорость скольжения	

Таблица 4

Соотношения для вычисления остаточного ресурса Θ дисперсии остаточного ресурса $D\{\Theta\}$ и вероятности безотказной работы $P(t)$

п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
1	1.1.1.1	$И_1$, $И_2$ — измерения износа в моменты t_1, t_2	$\Theta = \frac{И_{пред} - И_2}{k_1}$ $k_1 = \frac{И_2 - И_1}{t_2 - t_1}$	В случае отсутствия какой-либо информации о статистических особенностях механизма изменения величины износа $И(t)$ оценить $D\{\Theta\}$, $P(t)$ невозможно
2	1.1.1.1	$И_1$, $И_2$, ..., $И_n$ — результаты измерения износа в моменты t_1, t_2, ..., t_n	$\Theta = \frac{И_{пред} - И_n}{k_1}$ $D\{\Theta\} = \frac{(И_{пред} - И_n)k_2}{k_1^3} + \frac{\Theta^2}{k_1^2} D\{k_1\}$ $P(t) = \begin{cases} \Phi\left[\frac{И_{пред} - k_1 t}{(k_2 t)^{1/2}}\right], \text{ при } \left[\frac{(И_{пред} - И_n)k_1}{k_2}\right]^{1/2} \geqslant 3{,}5 \\ P^*(t), \text{ при } \left[\frac{(И_{пред} - И_n)k_1}{k_2}\right]^{1/2} < 3{,}5 \end{cases}$ $t > t_n$ $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z} e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$ $P^*(t)$ — табулированная функция (смотри номограмму на рисунке) при $\lambda = k_1^2/k_2$, $r = (И_{пред} - И_n)k_1/k_2$ k_1, k_2, $D\{k_1\}$ — вычисляется по формулам приложения 1	Среднее значение износа $И(t)$ возрастает во времени линейно, что наблюдается, например, при измерениях износа элементов цилиндро-поршневой группы [7], гусеничных и втулочно-роликовых цепей, накладок тормозов и дисков муфт сцепления, посадочных гнезд корпусных деталей [2], [6] и других изделий

Продолжение табл. 4

п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
3	1.1.1.1	$И_1, И_2, \ldots, И_n$ — результаты измерения износа в моменты $t_1, t_2, \ldots, t_n$	$\Theta = \left(\frac{И_{пред} - И_n}{k_{1,\alpha}}\right)^{1/\alpha}$, $P(t) = \begin{cases} \Phi\left[\frac{И_{пред} - И_n - k_{1,\alpha} t^\alpha}{(k_{2,\alpha} t^\alpha)^{1/2}}\right] \\ \text{при} \left[\frac{(И_{пред} - И_n) k_{1,\alpha}}{k_{2,\alpha}}\right]^{1/2\alpha} \geqslant 3{,}5 \\ P^*(t) \text{ при } \left[\frac{(И_{пред} - И_n) k_{1,\alpha}}{k_{2,\alpha}}\right]^{1/2\alpha} < 3{,}5 \end{cases}$ $D\{\Theta\} = \left[\frac{(И_{пред} - И_n) k_{2,\alpha}}{k_{1,\alpha}^3}\right] + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\Theta^2}{k_{1,\alpha}^2} D\{k_{1,\alpha}\}$ $P^*(t)$ — табулированная функция (см. номограмму на рисунке) при $\lambda = k_{1,\alpha}^2 / k_{2,\alpha}$, $r = (И_{пред} - И_n) k_{1,\alpha} / k_{2,\alpha}$, $k_{1,\alpha}$, $k_{2,\alpha}$, $D\{k_{1,\alpha}\}$ — вычисляется по формулам приложения 1	Среднее значение износа $И(t)$ возрастает во времени пропорционально t^α, что наблюдается при измерениях износа большой группы изделий, например, для элементов тракторов и сельхозмашин [6,2]
4	1.1.1.2	$И_1, \ldots, И_n$ — результаты измерений износа в моменты $t_1, \ldots, t_n$; V_{Θ^*} — коэффициент вариации ресурса	$\Theta = \frac{И_{пред} - И_n}{k_1}$, $D\{\Theta\} = V_{\Theta^*}^2 \cdot \left(\frac{И_{пред}}{k_1}\right)^2 \left(1 - \frac{И_n}{И_{пред}}\right) + \frac{\Theta^2}{k_1^2} D\{k_1\}$ $P(t)$ — определяется по формулам п. 2 данной таблицы, где $k_2 = V_{\Theta^*}^2 \cdot И_{пред} \cdot k_1$	1. Среднее значение $И(t)$ возрастает во времени линейно. 2. Коэффициент вариации ресурса V_{Θ^*} получен по результатам анализа совокупности изделий однородного качества (отклонения величины $И(t)$ от среднего для исследуемой совокупности изделий не носят си-

Продолжение табл. 4

п/п	*Шифр* ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
				стематического характера, а *лишь случайный*). В случае невыполнения второго условия данная ситуация переходит в ситуацию 1.1.1.1
5	1.1.1.2	$И_1, \ldots, И_n$ — результаты измерения износа в моменты $t_1, \ldots, t_n$; V_{Θ^*} — коэффициент вариации ресурса Θ^*	$\Theta = \left(\frac{И_{пред} - И_n}{k_{1,\alpha}}\right)^{1/\alpha}$ $D\{\Theta\} = V_{\Theta^*}^2 \cdot \left(\frac{И_{пред}}{k_{1,\alpha}}\right)^{2/\alpha} \left[1 - \frac{И_n}{И_{пред}}\right]^{1/\alpha} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\Theta^2}{k_{1,\alpha}^2} D\{k_{1,\alpha}\}$ $P(t)$ определяется по формулам п. 3 данной таблицы, где $k_{2,\alpha} = V_{\Theta^*}^{2\alpha} И_{пред} \cdot k_{1,\alpha}$	Среднее значение износа $И(t)$ возрастает во времени пропорционально t^α. Второе ограничение такое же, как в п. 4
6	1.1.1.2	$И_1, \ldots, И_n$ — результаты измерений износа в моменты $t_1, \ldots, t_n$; $V_n(t^*)$ коэффициент вариации значения $И(t)$ в произвольный момент времени t^*	$\Theta = \frac{И_{пред} - И_n}{k_1}$, $D\{\Theta\} = \frac{(И_{пред} - И_n) V_n^2(t^*) t^*}{k_1} + \frac{\Theta^2}{k_1^2} D\{k_1\}$, $P(t)$ определяется по формулам п. 2 данной таблицы, где $k_2 = V_n^2(t^*) \cdot t^* \cdot k_1^2$	Среднее значение износа $И(t)$ возрастает во времени линейно

п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
7	1.1.1.2	$И_1, \ldots, И_n$ — результаты измерений износа в моменты $t_1, \ldots, t_n$; V_v — коэффициент вариации средней интенсивности (скорости) изнашивания, изменяющейся в зависимости от изменения параметров режимов; k_2^* — значение скорости изменения дисперсии, полученное в условиях постоянных средних режимов испытаний (режимы стендовых испытаний)	$$\Theta = \frac{И_{пред} - И_n}{k_1},$$ $$D\{\Theta\} = \frac{(И_{пред} - И_n) k_2^* (1 + V_v)}{k_1^3} + \frac{\Theta}{k_1^2} D\{k_1\},$$ $P(t)$ определяется по формулам п. 2 данной таблицы, где $$k_2 = k_2^* (1 + V_v)$$	1. Среднее значение износа $И(t)$ возрастает линейно. 2. Если значение k_2^* получить не удается, то информацию о коэффициенте вариации параметров режимов испытаний V_v использовать нельзя, и обработка $И_1, \ldots, И_n$ производится по формулам ситуации 1.1.1.1
8	1.1.1.2	То же	$$\Theta = \left(\frac{И_{пред} - И_n}{k_{1,\alpha}} \right)^{1/\alpha},$$ $$D\{\Theta\} = \left[\frac{И_{пред} - И_n}{k_{1,\alpha}^3} \cdot k_{2,\alpha} \cdot (1 + V_v) \right]^{1/\alpha} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\Theta^2}{k_{1,\alpha}^2} D\{k_{1,\alpha}\},$$ $P(t)$ определяется по формулам п. 3 данной таблицы, где $$k_{2,\alpha} = k_{2,\alpha^*} \cdot (1 + V_v)$$	1. Среднее значение износа $И(t)$ возрастает во времени пропорционально t^α. 2. Ограничение такое же, как в п. 7

Продолжение табл. 4

п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
9	1.1.1.3	$И_{11}, И_{12}, \ldots, И_{1n}$ — измерение износа в моменты времени $t_1, \ldots, t_{n1}$ в режиме, характеризующемся давлением P_1 и скоростью скольжения трущихся поверхностей v_1; $И_{i1}, И_{i2}, И_{i3}, \ldots, И_{in_i}$ — измерения износа в моменты $t_1, t_2, \ldots, t_{ni}$ в режимах P_i, v_i. Для средней величины износа справедливо соотношение $И_{ср}=xP^{\gamma}\ v^{\beta}\ .t^{\alpha}$, где x, γ, β — неизвестные постоянные для всех реальных режимов; α — известная постоянная величина Необходимо оценить остаточный ресурс изделия, работающего в одном из исследуемых режимов v_j, P_j, если в момент t^* износ составил $И^*$	$$\Theta=\left(\frac{И_{пред}-И^*}{k_{1,\alpha}}\right)^{1/\alpha},$$ $$D\{\Theta\}=\left[\frac{(И_{пред}-И^*)k^i_{2,\alpha}}{(k^i_{1,\alpha})^3}\right]^{1/\alpha}$$ Вероятность $P(t)$ при $t>t^*$ оценивается по формулам п. 3 настоящей таблицы. Величина $k^i_{2,\alpha}$ определяется по приложению 1. Величина $k^i_{1,\alpha}$ оценивается по следующим формулам $k^i_{1,\alpha}=\hat{x}\hat{F}_i^{\hat{\gamma}}\ v^{\hat{\beta}}$, где $\hat{x}$, $\hat{\gamma}$, $\hat{\beta}$ оценки x, γ, β, определяемые по формулам (в случае, когда все три коэффициента неизвестны). $$\ln\hat{x}=\frac{\begin{vmatrix} k & P & V \\ P & k & P^2\ VP \\ V & k & PV\ V^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} M & P & V \\ P & P^2 & VP \\ V & PV & V^2 \end{vmatrix}},\quad \hat{\gamma}=\frac{\begin{vmatrix} M & k & V \\ P & Pk & VP \\ V & Vk & V^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} M & P & V \\ P & P^2 & VP \\ V & PV & V^2 \end{vmatrix}}$$ $$\hat{\beta}=\frac{\begin{vmatrix} M & P & k \\ P & P^2 & Pk \\ V & PV & Vk \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} M & P & k \\ P & P^2 & Pk \\ V & PV & Vk \end{vmatrix}},\ \text{где}\quad \begin{aligned} P&=\sum_{i=1}^{M}\ln P_i \\ V&=\sum_{i=1}^{M}\ln V_i \\ k&=\sum_{i=1}^{M}c_i\ln k^i_{1,\alpha} \end{aligned}$$	1. Минимальное число измерений износа в каждом режиме составляет 10. 2. Минимальное число режимов испытаний равно числу неизвестных постоянных, входящих в соотношение $И_{ср}=xP^{\gamma}\ v^{\beta}\ .t^{\alpha}$. 3. В случае неизвестного значения α оценить остаточный ресурс и его дисперсию в условиях имеющейся информации нельзя. В этом случае необходима дополнительная информация о параметрах, характеризующих дисперсию процесса изнашивания $И$ в каждом из режимов P, v

Продолжение табл. 4

п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
			M — число режимов; $k^i_{1,\alpha}$ — оценка $k_{1,\alpha}$ для режима P_i, v_i, $c_i = D^{-1}\{k^i_{1,\alpha}\}\left[\sum_{i=1}^{M} D\{k^i_{1,\alpha}\}\right]^{-1}$. Оценки $k_{1,\alpha}$ и $D\{k_{1,\alpha}\}$ по приложению 1	
10	1.1.1.3	Пункты 1.2 и 3 такие же, как в предыдущем случае (п. 9). Качество изделий неоднородно. Величина x постоянная, но случайная для каждого изделия. Известен коэффициент вариации этой величины V_x	$\Theta = \left(\frac{И_{пред} - И^*}{k^i_{1,\alpha}}\right)^{1/\alpha}$, $D\{\Theta\} = D_1 + D_2$ $D_1 = \left[\frac{(И_{пред} - И^*) k^i_{2,\alpha}}{(k^i_{1,\alpha})^3}\right]^{1/\alpha}$, $D_2 = \frac{1}{\alpha^2}\Theta^2 V^2_x$ для $k^i_{1,\alpha}$, $k^i_{2,\alpha}$ справедливы предыдущие формулы	Пункты 1.2.3 предыдущего случая справедливы
11	1.1.1.4	1. $И_1^*, \ldots, И_n^*$ — измерения износа в моменты $t_1, \ldots, t_n$ в режиме P^*, v^* (или n^*, см. табл. 2).	$\Theta = \left(\frac{И_{пред} - И_\tau}{k_{1,\alpha}}\right)^{1/\alpha}$, где $И_\tau$ — среднее значение величины износа $И$ в момент τ у изделия, безотказно проработавшего до этого момента в режиме P, v $k_{1,\alpha} = k^*_{1,\alpha}\left[L(P^*/P)^\gamma \cdot (v^*/v)^\beta\right]^{-\alpha}$,	1. Качество изделий, испытываемых в разных режимах P, v и P^*, v^*, однородно (см. п. 4 данной таблицы). 2. Среднее значение износа $И(t)$ изменяется во времени пропорционально t^α.

Продолжение табл. 4

п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
		2. Отношение ресурсов, выявленных в режимах P, v и P^*, v^*, $\Theta_1/\Theta_1^* = L(P^*/P)^{\gamma} \times (v^*/v)^{\beta}$, L, γ, β — известные постоянные. 3. Отношение коэффициентов вариации ресурсов изделий, выявленных в разных режимах $\frac{V_{\Theta}(V, P)}{V_{\Theta^*}(V^*, P^*)} = A$. 4. Некоторое изделие проработало в режиме безотказно время t. Необходимо оценить его остаточный ресурс.	$D\{\Theta\} = D_1 + D_2$, $D_1 = \left[\frac{(И_{пред} - И_{\tau})k_{2,\alpha}}{k_{1,\alpha}^3}\right]^{1/\alpha}$ Значения $k^*_{1,\alpha}$, $k^*_{2,\alpha}$, $D\{k^*_{1,\alpha}\}$ находятся согласно приложению 1. Величина $И_{\tau}$ находится по формуле $И_{\tau} = c\sum_{i}^{N} \frac{(\lambda\tau^*)^i}{i!} e^{-\lambda\tau^*}$, $\tau^* = \tau^{\alpha}$, где $N = \frac{И_{пред} \cdot k_{1,\alpha}}{k_{2,\alpha}} - 1$; $\lambda = \frac{k^2_{1,\alpha}}{k_{2,\alpha}}$; $c = \left[\sum^{N} \frac{(\lambda\tau^*)^i}{i!} e^{-\lambda\tau^*}\right]^{-1}$ Величины $\frac{(\lambda\tau^*)^i}{i!}$, $e^{-\lambda\tau^*}$ приведены в справочной литературе. *Вероятность безотказной работы* $P(t)$ *при* $t > \tau$ оценивается по формулам п. 3 подстановкой вместо $И_n$ значения $И_{\tau}$.	3. Если отношение A неизвестно, то оценку остаточного ресурса в режиме P, v получить можно, а дисперсию оценки — нельзя
12	1.1.1.4	Справедливы пункты 1, 2, 3 предыдущего случая. 5. В момент t_n для изделия, испытываемого в режиме P^*, v^* изменяют режим испытаний на P,	$\Theta = \left[\frac{И_{пред} - И^*_n}{k_{1,\alpha}}\right]^{1/\alpha}$, $k_{1,\alpha} = k^*_{1,\alpha}\left[L\left(\frac{P^*}{P}\right)^{\gamma}\left(\frac{v^*}{v}\right)^{\beta}\right]^{-\alpha}$,	Справедливы пункты 1, 2, 3 предыдущего случая

Продолжение табл. 4

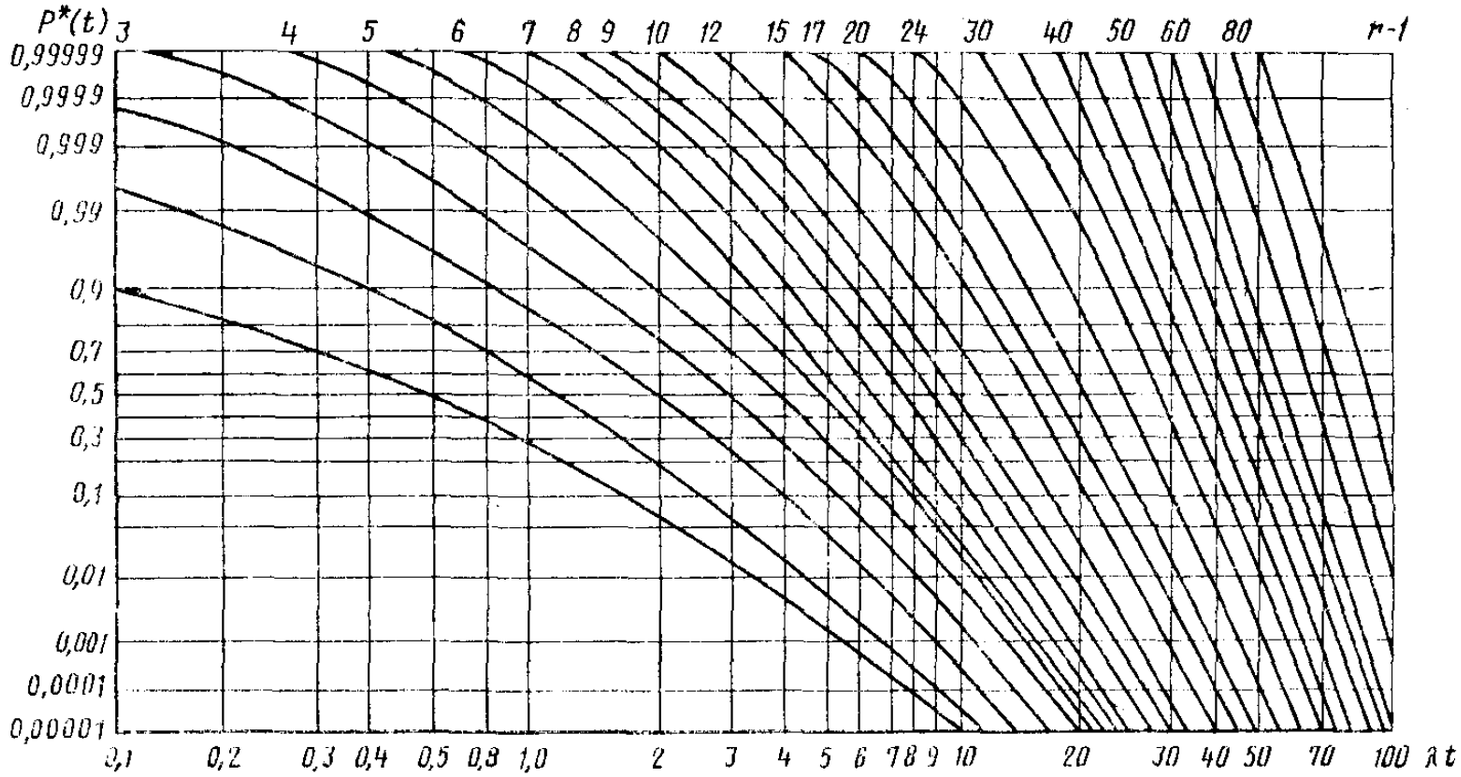
п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
		v. Необходимо оценить остаточный ресурс Θ — этого изделия в новом режиме	$D\{\Theta\}=D_1+D_2,$ $D_1=\left[\frac{(И_{\text{пред}}-И^*_{\text{п}})k_{2,\alpha}}{k^3_{1,\alpha}}\right]^{1/\alpha},$ $D_2=\frac{1}{\alpha^2}\cdot\frac{\Theta^2}{(k^*_{1,\alpha})^2}\cdot D\{k^*_{1,\alpha}\},$ $k_{2,\alpha}=A^{2,\alpha}\left[L\left(\frac{P^*}{P}\right)^{\gamma}\left(\frac{v^*}{v}\right)^{\beta}\right]^{-3\alpha}\cdot k^*_{2,\alpha}$ Вероятность $P(t)$ при $t>t_{\text{п}}$ оценивается по формуле п. 3 настоящей таблицы	
13	2.1.1.1	1. $x_1, \ldots, x_n$ — результаты измерения косвенного контролируемого параметра в моменты $t_1, \ldots, t_n$. 2. Имеется функциональная связь между предельным значением износа $И_{\text{пред}}$ и соответствующим ему значением косвенного контролируемого параметра x^* $x^*=f(И_{\text{пред}})$	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$ определяются по формулам п. 2 или п. 3, где заменить $И_{\text{пред}}$ на x^*, $И_{\text{п}}$ на $x_{\text{п}}$	Взаимно однозначное соответствие между значениями прямого и косвенного контролируемого параметра

Продолжение табл. 4

п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
14	2.2.3.1	1. $x_1, \ldots, x_n$ — результаты измерений косвенного параметра в моменты времени $t_1, \ldots, t_n$. 2. Статистическая связь между износами $И(t)$ и косвенным параметром $x(t)$ отсутствует. 3. Для средних значений $m_{И}(t)$ и $m_x(t)$ справедливо $m_и(t)/m_x(t)=\psi(t)$, $\psi(t)$ — известная функция времени (обычно, $\psi(t)=ct^k$). 4. Известно поле регрессии $\{x, И\}$, определяющее $\delta_x(И)$ относительное отклонение величины износа при фиксированном значении косвенного контролируемого параметра. 5. Корреляцию между $x_i(t)$ и $И_i(t)$ выявить не удалось	$$\Theta=\left(\frac{И_{пред}-И^*}{k^{И}_{1,\alpha}}\right)^{1/\alpha},$$ $$k^{И}_{1,\alpha}=k^{x}_{1,\beta}\cdot t^{\beta}\cdot\psi(t)/t^{\alpha},$$ $k^{x}_{1,\beta}$ определяется при обработке $x_1, x_2, \ldots, x_n$ по приложению 1; $И^*$ определяется по регрессии $\{x, И\}$ при $x=x_n$; $$D\{\Theta\}=D_1+D_2,$$ $$D_1=\left[\frac{(И_{пред}-И^*)k^{И}_{2,\alpha}}{(k^{И}_{1,\alpha})^3}\right]^{1/\alpha},$$ $k^{И}_{2,\alpha}$ *определяется по приложению 1 при обработке*; $И_1, \ldots, И_n$, определенных по регрессии $\{x, И\}$ при фиксированных $x_1, \ldots, X_n$, $$D_2=\frac{1}{\alpha^2}\cdot\frac{\Theta^2}{(k^{x}_{1,\beta})^2}\cdot D\{k^{x}_{1,\beta}\}+$$ $$+\frac{1}{\alpha^2}\cdot\frac{\Theta^{\frac{2(1-\alpha)}{\alpha}}}{(k^{И}_{1,\alpha})^2}\cdot\delta^{2}_{x_n}(И)\cdot(И^*)^2,$$ $\delta_{x_n}(И)$ — среднее относительное отклонение значения $И$ при фиксированном x_n на поле регрессии $\{x, И\}$	

Продолжение табл. 4

п/п	Шифр ситуации	Исходная информация	Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$	Ограничения (примечания)
15	2.2.2.1	Пункты 1, 2, 3, 4 предыдущей ситуации справедливы. 5. Выявлена статистическая связь между значениями $x_i(t)$ и $И_i(t)$ в совпадающие моменты времени. Определен коэффициент корреляции $R[x(t), И(t)] = R$	$\Theta = \left(\frac{И_{пред} - И^*}{k^{И}_{1,\alpha}} \right)^{1/\alpha}$, $k^{И}_{1,\alpha} = k^{x}_{1,\beta} \cdot t^{\beta} \cdot \psi(t)/t^{\alpha}$, $И^* = k^{И}_{1,\alpha} \cdot t_n^{\alpha} + R[x_n - k^{x}_{1,\beta} \cdot t^{\beta}]$, $D\{\Theta\} = D_1 + D_2$, $D_1 = \left[\frac{(И_{пред} - И^*) \cdot k^{И}_{2,\alpha}}{k^{И}_{1,\alpha}} \right]^{1/\alpha}$, $D_2 = \frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{\Theta^2}{(k^{x}_{1,\beta})^2} \cdot D\{k^{x}_{1,\beta}\} + \frac{1}{\alpha^2} \times$ $\times \frac{\Theta^{2\frac{(1-\alpha)}{\alpha}}}{(k^{И}_{1,\alpha})^2} \cdot [k^{И}_{2,\alpha} \cdot t^{\alpha} - (k^{И}_{2,\alpha} \cdot t_n^{\alpha} \cdot k^{x}_{2,\beta} \cdot t_n^{\beta})^{1/2} R]$	
16	1.2.1.3	Измерение величины износа нескольких элементов одного изделия. Корреляция между величинами износов отсутствует	Для каждого элемента вычисляется Θ, $D\{\Theta\}$, $P(t)$ по формулам п. 10, 9 данной таблицы. Общий остаточный ресурс равен минимальному остаточному ресурсу среди элементов. Вероятность безотказной работы равна произведению вероятностей, рассчитанных для элементов	
17	2.2.2(3).1			Ситуация рассмотрена в приложении 2


P*(t)
0,99999
0,9999
0,999
0,99
0,9
0,7
0,5
0,3
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,00001
3
4
5
6
7
8
9
10
12
15
17
20
24
30
40
50
60
80
n-1
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,8
1,0
2
3
4
5
6
7
8
9
10
20
30
40
50
70
100
λt

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Справочное

Оценивание величин κ_1, κ_2, $\kappa_{1,\alpha,}$, $\kappa_{2,\alpha,}$, $D\{\kappa_1\}$, $D\{\kappa_{1,\alpha,}\}$ $И_1$, $И_2$, ., $И_n$ — результаты измерения контролируемого параметра в моменты $t_1, \ldots, t_n$

$$\kappa_1 = \frac{I_{0\,5\,n}}{V_{0\,5,\,n}}, \qquad \kappa_{1,\alpha} = \frac{I_{\alpha\,2,n}}{V_{3/2\,\alpha,\,n}},$$

$$D\{\kappa_1\} = \kappa_2 \left[V_{2,n} + 2V^*_{1,n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{t_i}{t_i - t_{i-1}} \right)^{1/2} \right],$$

$$D\{\kappa_{1,\alpha}\} = \kappa_{2,\alpha} \left[V_{2\alpha,n} + 2V^*_{\alpha,n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{t_i}{t_i - t_{i-1}} \right)^{1/2} \right]$$

$$\kappa_2 = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^{l} \frac{I^{\,0}_{1,n_j}}{V_{1,n_j}}, \qquad \kappa_{2,\alpha} = \sum_{j=1}^{l} \frac{I^{\,0}_{\alpha,n_j}}{V_{\alpha,n_j}}$$

$l = \frac{t_n}{\tau}$, τ — отрезок времени произвольной длины ($l > 3$), в котором находится n_j штук измерений $И(t)$

$$I^*_{0,5\,n} = \sum_{i=1}^{n} t_i^{0,5} \cdot И(t_i), \qquad I_{\alpha/2,\,n} = \sum_{i=1}^{n} t_i^{\alpha,2}\ И(t_i),$$

$$V_{к,\,n} = \sum_{i=1}^{n} И^к(t_i), \qquad V^*_{k,\,n} = \sum_{i=1}^{n} И^к(t_{i-1}),$$

$$I^{\,0}_{k,\,n} = \sum_{i=1}^{n} t_i^k И^2(t_i)$$

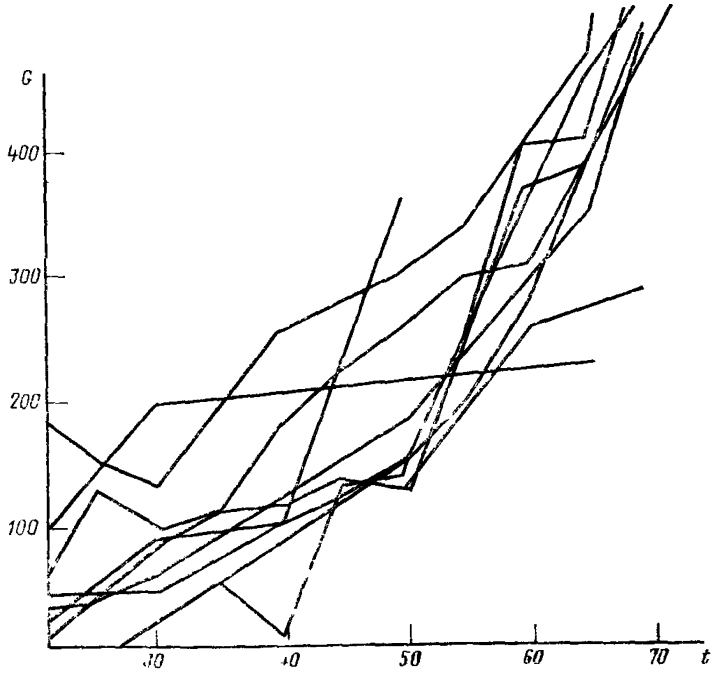
ПРИЛОЖЕНИЕ 2

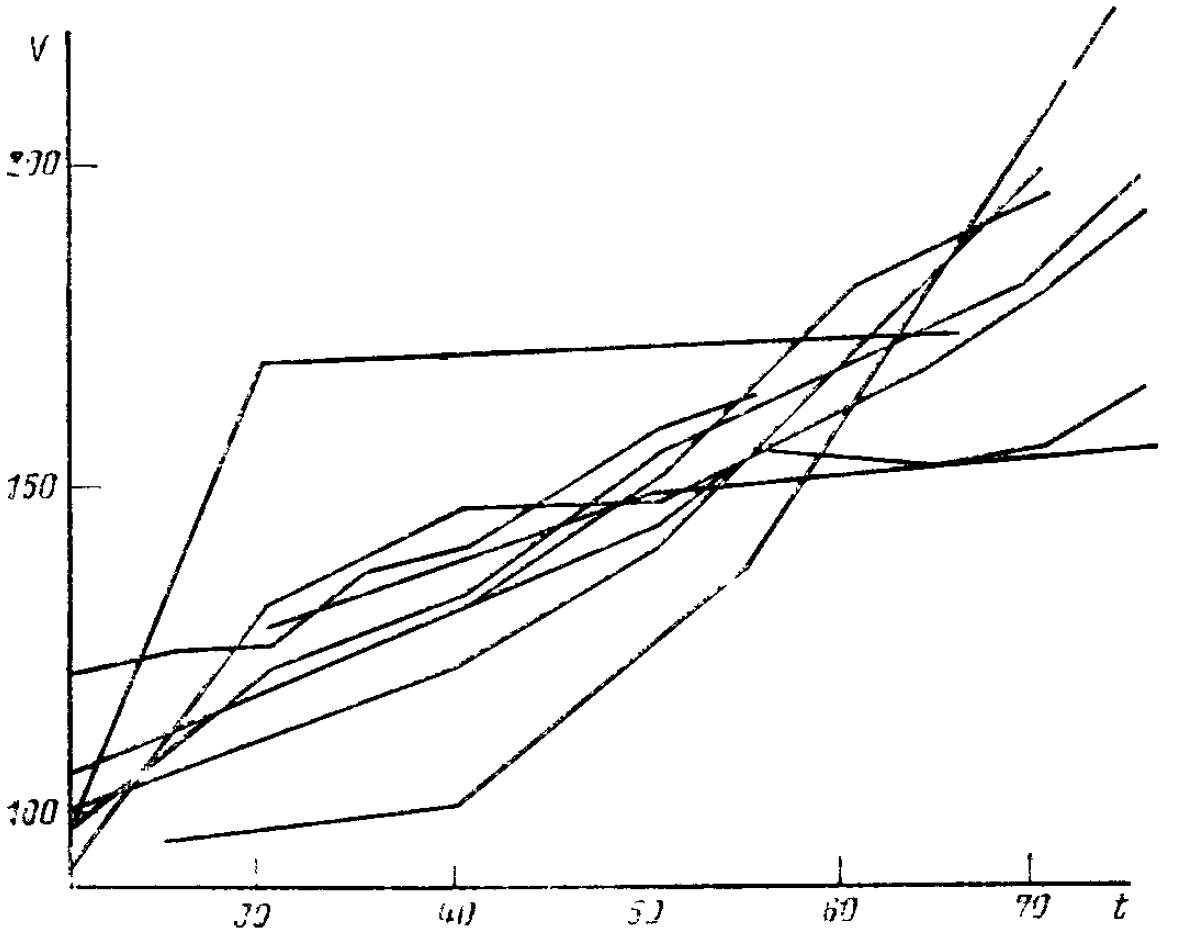
Рекомендуемое

Пример. Оценивание остаточного ресурса цилиндропоршневой группы двигателя ЗМЗ-53 по результатам стендовых испытаний.

В процессе стендовых испытаний двигателя периодически через 5 ч работы замерялись параметры угар масла G, пропуск газов в картер V по мере необходимости разборки агрегата, износ элемента канавка-поршневое кольцо Δ

Результаты измерений представлены на рис. 1, 2, 3. Измерения производились после окончания приработки.




V
200
150
100
30
40
50
60
70
t

Δ
300
200
100
30
40
50
60
70
t

Изменение $G(t)$, $V(t)$, $\Delta(t)$ тесно связано с необратимыми процессами накопления повреждений в изнашивающихся поверхностях, что приводит к монотонному процессу изменения рассматриваемых контролируемых параметров G, V, Δ.

В первом приближении, по крайней мере для реальных приращений параметров между измерениями, можно считать, как это принято в большинстве работ, приращения G, V, Δ независимыми. Это дает основание использовать при описании G, V, Δ, N марковскую аппроксимацию.

Таким образом, априорно принимаем, что G, V, Δ, N представляют нормальные нестационарные процессы с математическими ожиданиями:

$\kappa_0^G + \kappa_1^G \cdot t^{1,57}$ — для процесса расхода масла $G(t)$;

$\kappa_0^V + \kappa_1^V \cdot t$ — для процесса пропуска газов $V(t)$;

$\kappa_0^\Delta + \kappa_1^\Delta \, t$ — для процесса увеличения зазора $\Delta(t)$;

κ_0^G, κ_0^V, κ_0^Δ — случайные начальные величины, равные значениям $G(t)$, $V(t)$, $\Delta(t)$ в момент окончания приработки t^0.

Дисперсии рассматриваемых процессов равны $D\{G(t)\}=\kappa_2^G \cdot t^{1,57}$; $D\{V(t)\}=\kappa_2^V \cdot t + D\{\kappa_0^V\}$; $D\{\Delta(t)\}=\kappa_2^\Delta \, t + D\{\kappa_0^\Delta\}$.

Коэффициенты κ_1^V, κ_1^G, κ_1^Δ, κ_2^G, κ_2^V, κ_2^Δ — постоянные и определяются экспериментально. В табл. 2.1—2.5 обобщены результаты обработки экспериментальных данных по оцениванию параметров процессов.

Таблица 2.1

Характеристики $G(t)$

κ_0^G	$m\{\kappa_0^G\}$	$D\{\kappa_0^G\}$	κ_1^G	κ_2^G
0	0	0	1	37

Таблица 2.2

Характеристики $V(t)$

κ_0^V	$m\{\kappa_0^V\}$	$D\{\kappa_0^V\}$	κ_1^V	κ_2^V
120	120	0	1,8	2

Таблица 2.3

Характеристики $\Delta(t)$

κ_0^Δ	$m\{\kappa_0^\Delta\}$	$D\{\kappa_0^\Delta\}$	κ_1^Δ	κ_2^Δ
	70	308	9	84

Перечисленные контролируемые параметры Δ, G, V характеризуют техническое состояние двигателя и по мере выработки ресурса монотонно изменяются. Двигатель постепенно теряет свои эксплуатационные качества, что ведет к увеличению по сравнению с первоначальными значениями величин Δ, G, V.

Из анализа причин изменения Δ, G, V следует, что один из факторов — износ элементов, от которого зависит величина зазора Δ, является причиной изменения всех контролируемых параметров Δ, G, V. Если этот случайный фактор будет доминировать при формировании значений Δ, G, V над всеми остальными

случайными факторами, то между параметрами может появиться регрессионная связь $\Delta=f(G,\ V)$, функцию f ищем в виде

$$\Delta=c_1\cdot V+c_2G+c_3,$$

где c_1, c_2, c_3 — неизвестные постоянные коэффициенты.

Минимизируя по c_1, c_2, c_3 квадратичную форму

$$\sum_{i=1}^{N}[\Delta_i-c_1V_i-c_2G_i-c_3]^2,$$

где N — количество измерений, получим следующие значения для неизвестных постоянных $c_1=4{,}5$; $c_2=0{,}1$; $c_3=-570$.

Полученную регрессионную зависимость можно использовать для прогнозирования остаточного ресурса двигателя по износу, при этом могут возникнуть две ситуации.

1. Прямые измерения Δ отсутствуют.

Используя регрессионную зависимость, $\Delta=4{,}5\cdot V+0{,}1\cdot G-570$.

Необходимо для каждого момента измерения $\{G,\ V\}_{t_i}$ построить соответствующие значения величин $\Delta(t_i)$.

Обрабатывая $\{t_i\}$ методом наименьших квадратов, определяем κ_1^{Δ}, κ_2^{Δ}.

Остаточный ресурс Θ и дисперсия $D\{\Theta\}$ определяются по формулам

$$\Theta=\frac{И_{\text{пред}}-[4{,}5\cdot V(t_N)+0{,}1\cdot G(t_N)-570]}{k_1^{\Delta}},$$

$$D\{\Theta\}=\frac{И_{\text{пред}}\cdot k_2^{\Delta}}{(k_1^{\Delta})^3},$$

где $V(t_N)$, $G(t_N)$ — последние измерения V, G.

2. Известна величина износа после приработки Δ^*.

Уточняется коэффициент c_3 в регрессионной зависимости

$$c_{3(\text{уточн})}=\Delta^*-4{,}5\cdot V-0{,}1\cdot G,$$

где V, G замерены после приработки.

Заменяя c_3 на $c_{3(\text{уточн.})}$, определяем Θ, $D\{\Theta\}$ по формулам ситуации 1.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Справочное

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Задача оценивания остаточного ресурса, то есть задача прогнозирования момента наступления предельного состояния, должна постоянно решаться при обосновании сроков осмотров, ремонтов, списания.

Прогнозирование момента наступления предельного состояния основано на анализе основных механизмов, протекающих в изделии и приводящих к отказам. Существует большая группа изделий, у которых в качестве основного механизма развития отказа выступает механизм накопления повреждений в результате изнашивания. Изменение контролируемых параметров при этом, параметров, прямо или косвенно связанных с параметрами процесса изнашивания, подчинено четко выраженным закономерностям:

изменение обусловлено процессами накопления отдельных элементарных повреждений,

монотонность изменения параметров.

Эти общие закономерности отражены в моделях, нашедших свое применение при исследовании большой группы изделий [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Дальнейшее развитие моделей процессов изнашивания пошло по пути использования различных марковских аппроксимаций. Наиболее простая аппроксимация, заключающаяся в представлении величины контролируемого параметра изменяющегося под влиянием изнашивания, в виде суммы независимых приращений положена в основу данных методических указаний. Физические предпосылки возникновения условий справедливости таких моделей достаточно полно изложены в [9], что использовалось при разработке ряда нормативных документов, например, [3].

Динамика изменения контролируемого параметра может быть представлена в общем виде неоднородным пуассоновским процессом. При этом математическое ожидание процесса $m_x(t)$, дисперсия $D_x(t)$ для достаточно общего случая имеют вид

$$m_x(t)=k_{1,\alpha}\cdot t^{\alpha}\ , \qquad (\alpha>0);$$

$$D_x(t)=k_{2,\alpha}\cdot t^{\alpha}\ ,$$

где α, $k_{1,\alpha}$, $k_{2,\alpha}$ — постоянные коэффициенты.

Если контролируемый параметр изменяется в области, ограниченной сверху некоторым предельным значением $И_{пред}$, то получено [1, 10], что моменты t_i наработки (превышение значением $x(t)$ предельного значения $И_{пред}$) могут подчиняться гамма-распределению, нормальному, логарифмически-нормальному и другим в зависимости от видов $m_x(t)$, $D_x(t)$.

В частности для степенного изменения $m_x(t)$ и $D_x(t)$ получено

$$f(t)=\frac{1}{\Gamma\left(\frac{И_{пред}}{k_{2,\alpha}}\cdot k_{1,\alpha}\right)}\cdot\left(\frac{k_{1,\alpha}^2}{k_{2,\alpha}}\right)^{\frac{И_{пред}\cdot k_{1,\alpha}}{k_{2,\alpha}}}\cdot t^{И_{пред}\cdot\frac{k_{1,\alpha}}{k_{2,\alpha}}-1}$$

$$\cdot e^{-\frac{И_{пред}\cdot k_{2,\alpha}}{k_{2,\alpha}}\cdot t};\qquad \text{при}\ \left(\frac{И_{пред}\cdot k_{1,\alpha}}{k_{2,\alpha}}\right)^{1/2\alpha}>3{,}5, \qquad (t\geqslant 0);$$

$$f(t) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma_t} \cdot e^{\frac{-(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} \quad \text{при} \quad \left(\frac{И_{\text{пред}} \cdot k_{1,\alpha}}{k_{2,\alpha}}\right)^{1/2\alpha} \leqslant 3{,}5;$$

$$\text{где } \sigma_t^2 = \left[\frac{И_{\text{пред}} \cdot k_{2,\alpha}}{k_{1,\alpha}^3}\right]^{1,\alpha}, \quad m_t = \left(\frac{И_{\text{пред}}}{k_{1,\alpha}}\right)^{1,\alpha}.$$

Такое представление плотности $f(t)$ может быть положено в основу методики прогнозирования остаточного ресурса.

Различные случаи, рассмотренные в работе, отличаются объемом и видом априорной информации, наиболее характерной при испытаниях того или иного вида изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов.— М.: Советское радио. 1966, 166 с.
2. ГОСТ 21571—76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин.
3. ГОСТ 23.205—79. Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима.
4. Елизаветин М. Л. Повышение надежности машин.— М.: Машиностроение, 1973, 430 с.
5. Крагельский И. В. и др. Основы расчетов на трение и износ.— М.: Машиностроение, 1977.
6. Михлин В. М. и др. Методические указания по прогнозированию технического состояния машин.— М., ОНТИ ГОСНИТИ, 1972, 61 с.
7. ОСТ 24.060 08. Дизели. Методы испытаний на надежность.
8. Пащенко В. Л. Оценка ресурса наносных установок с дроссельным регулированием подачи.— Вестник машиностроения, 1981, № 5, с. 25—27.
9. Севернев М. М. и др. Износ деталей сельскохозяйственных машин.— Л.: Колос, 1972, 287 с.
10. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы.— М.: Советское радио, 1977, 510 с.
11. Справочник по надежности.— М.: Мир, 1969.
12. Трение, изнашивание, смазка.: Справочник/Под ред. Крагельского И. В.— М.: Машиностроение, 1979.
13. Pandit S. M., Shiekh A. K. Reliability and Optimal Replacement via Coefficient of Variation.— Transaction of the ASME. 1980., N 4, p. 61—70.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения 1
2. Характеристика типовых ситуаций, возникающих при оценивании остаточного ресурса 2
3 Методы оценивания остаточного ресурса 2
Приложение 1 27
Приложение 2 28
Приложение 3 32
Список литературы 34

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Надежность в технике. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей, подверженных изнашиванию

РД 50-423—83

Редактор *Т. В. Пантелеева*
Технический редактор *Н. В. Келейникова*
Корректор *М. М. Герасименко*

Сдано в наб. 30.01.84 Подп в печ. 02.10.84 Т—13525 Формат 60×90/16 Бумага книжно-журнальная Гарнитура литературная Печать высокая 2,25 усл. п. л. 2,5 усл. кр.-отт. 2,05 уч.-изд. л. Тираж 2.000 Зак. 1195 Изд. № 8045/4 Цена 15 коп.

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123840, Москва, ГСП, Новопресненский пер., д. 3.
Вильнюсская типография Издательства стандартов, ул. Миндауго, 12/14.

gost.e-ecolog.ru