

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА.
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО
РЕСУРСА МАШИН И ДЕТАЛЕЙ
ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ
РД 50-490-84**

**Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
1985**

РАЗРАБОТАНЫ Государственным комитетом СССР по стандартам
Министерством тракторного и сельскохозяйственного машиностроения

ИСПОЛНИТЕЛИ

Л. А. Лейфер, канд. техн. наук; А. И. Илларионов, канд. техн. наук;
Л. Н. Евстафьева; В. И. Чумак, канд. техн. наук; В. П. Важаев; П. Ш. Петросян;
Ю. С. Борисов; В. Ю. Лимарь; Ю. Л. Калинин

ВНЕСЕНЫ Государственным комитетом СССР по стандартам

Начальник Управления машиностроения В. Н. Шахурин

УТВЕРЖДЕНЫ И ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 июля 1984 г.
№ 2577

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Техническая диагностика.
Прогнозирование остаточного ресурса машин
и деталей по косвенным параметрам

РД
50—490—84

Введены
впервые

Утверждены Постановлением Госстандарта от 24 июля 1984 г. № 2577, срок введения установлен

с 01.08.85

до 01.08.90

Методические указания распространяются на изделия, отказы которых вызваны процессами накопления повреждений. Изменение технического состояния характеризуется непрерывным изменением прямых (структурных) и косвенных (диагностических) параметров.

В методических указаниях рассматриваются методы оценивания остаточного ресурса в условиях основных типовых ситуаций, возникающих в практике испытаний и эксплуатации, отличающихся объемом и видом исходной для обработки информации.

Методические указания предназначаются для специалистов испытательных лабораторий, эксплуатационных и ремонтных служб, занимающихся вопросами прогнозирования технического состояния, прогнозирования остаточного ресурса, сроков и объемов ремонта.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Среди параметров технического состояния (ПТС) различают прямые и косвенные параметры.

Прямой ПТС — это параметр технического состояния (ТС), непосредственно характеризующий конкретное свойство объекта или его составной части — и определяющий его предельное состояние. Косвенный ПТС — это параметр ТС, связанный с прямым ПТС детерминированной или стохастической зависимостью, изменяющийся в результате изменения прямых ПТС. Например, согласно ГОСТ 20760—75 при диагностировании цилиндропоршневой группы трактора прямым параметром может служить зазор между

поршнем и гильзой в верхнем поясе, а соответствующими косвенными — количество газов, прорывающихся в картер, расход масла на угар, крутящий момент, необходимый для прокручивания двигателя при отключенной подаче топлива.

1.2. Номенклатура прямых ПТС принимается в соответствии с техническими условиями на конкретный объект.

1.3. Величина остаточного ресурса изделия определяется его наработкой с момента прекращения испытаний или эксплуатации до наступления предельного состояния изделия.

Определение термина «предельное состояние» по ГОСТ 27.002—83. Остаточный ресурс изделия в целом определяется остаточным ресурсом его составных частей. Перечень основных составных частей, определяющих ресурс и предельное состояние изделия в целом, устанавливается разработчиком и вносится разработчиком в соответствии с РД 50—202—80.

1.4. Общая характеристика изделий, для которых необходимо определять величину остаточного ресурса приведена в ГОСТ 23642—79 (СТ СЭВ 878—78).

1.5. Прогнозирование остаточного ресурса изделия по косвенным параметрам основано на одновременном выполнении условий: известные физические процессы, приводящие к ресурсным отказам, а также математические модели изменения прямых (структурных) и косвенных (диагностических) параметров,

для каждого прямого ПТС установлены предельные значения, достижение которых определяет величину ресурса по данному параметру,

в процессе наблюдения за изменением технического состояния изделия имеется возможность фиксации параметров, отражающих индивидуальные особенности изделия,

имеется информация о функциональных или регрессионных соотношениях между прямыми и косвенными ПТС,

зависимость между математическими ожиданиями прямых и косвенных ПТС является монотонной и непрерывной.

1.6. Определение остаточного ресурса по косвенным ПТС сопровождается, в общем случае, тремя видами погрешностей: погрешностями измерения косвенных параметров; погрешностями, связанными со случайной природой физических процессов развития отказов, а также методическими погрешностями определения прямых ПТС по значениям косвенных.

1.7. Теоретическое обоснование методов прогнозирования остаточного ресурса по результатам измерения косвенных ПТС приведено в приложении 1.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА. ОПИСАНИЕ ТИПОВЫХ СИТУАЦИЙ

2.1. Определение остаточного ресурса осуществляется для объектов, у которых связь между прямыми параметрами (x_1, \dots, x_r),

результатами измерения (z_1, \dots, z_l) косвенных параметров (y_1, \dots, y_e) описывается посредством регрессионных зависимостей

$$\begin{cases} x_1 = F_1(z_1, \dots, z_l, a_{11}, \dots, a_{1l}) + E_1, \\ \dots \\ x_r = F_r(z_1, \dots, z_l, a_{r1}, \dots, a_{rl}) + E_r, \end{cases} \quad (1)$$

где a_{11}, \dots, a_{rl} — коэффициенты детерминированной взаимнооднозначной зависимости; $F_i(z_1, \dots, z_l, a_{i1}, \dots, a_{il})$ — детерминированная функция; E_i — случайная погрешность, включающая в себя погрешность изготовления и методическую погрешность, распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_i^2 .

Примечание. Прямой параметр x_i может зависеть не от всей совокупности косвенных, а только от ее части.

2.2. Косвенные параметры y_1, \dots, y_l представляют собой случайные процессы с независимыми приращениями, математическое ожидание и дисперсия которых изменяется во времени монотонно по степенной зависимости.

Например, согласно ГОСТ 21571—76 для процессов, характеризующих изменение технического состояния составных частей тракторов и сельскохозяйственных машин, математическое ожидание изменяется во времени t по закону t^α , где показатель α определяется экспериментально.

При этом сам косвенный параметр может меняться монотонно (в случае изнашивания) и немонотонно (в случае изнашивания с упрочнением).

2.3. В зависимости от того, какой информацией располагает исследователь относительно объекта, остаточный ресурс которого прогнозируется, возможны три группы типовых ситуаций (ТС)

2.4. Первая группа типовых ситуаций (ТС1) характеризуется наличием следующей информации:

вид функции $F_i(z_1, \dots, z_l, a_{i1}, \dots, a_{il})$, все коэффициенты a_{ij} ($i=1, \dots, r; j=1, \dots, l$), дисперсии σ_i^2 известны,

имеются результаты периодических измерений каждого косвенного параметра $z_i(t)$.

2.5. Вторая группа типовых ситуаций (ТС2) характеризуется следующей информацией:

вид функций $F_i(z_1, \dots, z_l, a_{i1}, \dots, a_{il})$ известен, коэффициенты a_{ij} неизвестны, имеются результаты периодических измерений косвенных параметров $z_i(t)$, а также результаты обучающего эксперимента, в процессе которого производится одновременное измерение прямых и косвенных ПТС.

2.6. Третья группа типовых ситуаций (ТС3) характеризуется следующей информацией:

функция $F_i(z_1, \dots, z_l; a_{i1}, \dots, a_{il})$ монотонна и непрерывна (общий вид неизвестен),

имеются результаты обучающего эксперимента,

2.7. Внутри каждой группы ситуации различаются в зависимости от числа прямых и косвенных ПТС.

2.8. Для каждой ТС необходимо по результатам периодических измерений косвенных параметров в течение определенной наработки оценить величину остаточного ресурса и его дисперсию для изделия или его составной части.

2.9. Примеры типовых ситуаций приведены в приложении 2.

3. РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

3.1. Соотношения для расчета $t_{\text{ост}}$, $D\{t_{\text{ост}}\}$ для основных типовых ситуаций приведены в таблице, где использованы следующие обозначения:

Π_n — предельное значение прямого параметра при нулевом номинальном значении;

y_n — значение косвенного параметра $y(t)$ после выработки ресурса t_n .

Оценки параметров K_1 , K_2 , входящих в характеристики косвенного параметра $y(t)$, а также значение показателя α вычисляются согласно приложению 3.

3.2. Дисперсия оценки остаточного ресурса $D\{t_{\text{ост}}\}$ представляет собой сумму трех слагаемых

$$D\{t_{\text{ост}}\} = D_1 + D_2 + D_3.$$

3.3. В таблице приведены соотношения для расчета $t_{\text{ост}}$ и $D\{t_{\text{ост}}\}$ для наиболее распространенных соотношений между косвенными и прямыми параметрами.

Для более сложных нелинейных соотношений

$$x_i = F_i(z_1, \dots, z_i; a_{i1}, \dots, a_{ii}) + E_i$$

аналитически рассчитать величины $t_{\text{ост}}$ и $D\{t_{\text{ост}}\}$ можно лишь для случаев

$$D_1 \ll D_2, D_3.$$

В этом случае величина $t_{\text{ост}}$ определяется из уравнения (2).

$$\Pi_{ni} - F_i(K_{11} \cdot t^{\alpha_1}, K_{12} \cdot t^{\alpha_2}, \dots, K_{1i} \cdot t^{\alpha_i}, a_{i1}, \dots, a_{ii}) = 0 \quad (2)$$

где K_{1i} , α_i — параметры, определяющие изменение математического ожидания i -го косвенного параметра $y_i(t)$

$$m_i(t) = K_{1i} t^{\alpha_i}.$$

Величина D_2 рассчитывается по формуле

$$D_2 = \left(\frac{dt_{\text{ост}}}{dK_{1i}} \right)^2 \cdot D\{K_{1i}\},$$

где $t_{\text{ост}}$ — функция, зависящая от Π_{ni} ; K_{11}, \dots, K_{1i} ; $\alpha_1, \dots, \alpha_i$, получаемая при решении уравнения (2).

3.4. Примеры расчета остаточного ресурса приведены в приложении 4.

Соотношения для вычисления $t_{ост}$ и $D\{t_{ост}\}$

Шифр ситуации	Соотношения между прямыми и косвенными параметрами. Вид $m_y(t)$, $D_y(t)$	$t_{ост}$	$D\{t_{ост}\}$		
			D_1	D_2	D_3
1	2	3	4	5	6
ТС 1.1	<p>Один косвенный параметр $y(t)$, один прямой $x(t)$</p> <p>$x = a \cdot y^\beta(t) + E$ $m_y(t) = K_1 \cdot t^\alpha$ $D_y(t) = K_2 \cdot t^\alpha$ $y_n = y(t_n)$</p>	$\left\{ \frac{\Pi_{\Pi} - ay_{\Pi}^{\beta}}{K_1^x} \right\}^{1/\alpha}$ $K_1^x = aK_1 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\beta-1}$	$\left\{ \frac{(\Pi_{\Pi} - ay_{\Pi}^{\beta}) K_2^x}{(K_1^x)^3} \right\}^{1/\alpha}$ $K_2^x = a^2 K_2 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{2\beta-2}$	$\frac{t_{ост}^2}{\alpha^2} \cdot \frac{D\{K_1^x\}}{(K_1^x)^2}$ $D\{K_1^x\} =$ $= \frac{a^2(\beta-1)^2 \cdot K_2^{2(\beta-2)}}{K_1^{\beta-2}} \times$ $\times D\{K_2\} +$ $+ \frac{a^2(2-\beta)^2 K_2^{2(\beta-2)}}{K_1^{2(\beta-3)}} \times$ $\times D\{K_1\}$	$\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2} \times$ $\times \frac{\sigma_E^2}{(K_1^x)^2}$

Шифр ситуации	Соотношения между прямыми и косвенными параметрами. Вид $m_y(t)$, $D_y(t)$	$t_{ост}$	$D\{t_{ост}\}$		
			D_1	D_2	D_3
1	2	3	4	5	6
ТС 1.2	<p>Один косвенный параметр $y(t)$ и один прямой $x(t)$</p> <p>$x(t) = ay + by^\beta + E$ $m_y(t) = K_1 \cdot t^\alpha$ $D_y(t) = K_2 \cdot t^\alpha$</p>	$\left\{ \frac{\Pi_{\Pi} - ay_{\Pi} - by_{\Pi}^{\beta}}{K_1^x} \right\}^{1/\alpha}$ <p>$K_1^x = aK_1 + bK_1 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\beta-1}$</p>	$\left\{ \frac{(\Pi_{\Pi} - ay_{\Pi} - by_{\Pi}^{\beta}) K_2}{(K_1^x)^3} \right\}^{1/\alpha}$ <p>$K_2^x = \left[a \frac{K_2}{K_1} + b \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\beta-1} \right]^2 K_2$</p>	$\frac{t_{ост}^2}{\alpha^2} \cdot \frac{D\{K_1^x\}}{(K_1^x)^2}$ <p>$D\{K_1^x\} =$ $= \frac{b^2(\beta-1)^2 \cdot K_2^{2(\beta-2)}}{K_1^{(\beta-2)^2}} \times$ $\times D\{K_2\} +$ $+ \left[\frac{b^2(2-\beta)^2 K_2^{2(\beta-1)}}{K_1^{2(\beta-1)}} + \right.$ $\left. + a^2 \right] \cdot D\{K_1\}$</p>	$\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2} \times$ $\times \frac{\sigma_E^2}{(K_1^x)^2}$

Шифр ситуации	Соотношения между прямыми и косвенными параметрами. Вид $m_y(t)$, $D_y(t)$	$t_{\text{ост}}$	$D\{t_{\text{ост}}\}$		
			D_1	D_2	D_3
1	2	3	4	5	6
ТС 1.3	<p>Один косвенный параметр, один прямой</p> $x(t) = ay(t) + E$ $m_y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$ $D_y(t) = K_2 \cdot t^3$	<p>Оценка величины $t_{\text{ост}}$ находится из решения уравнения</p> $\frac{\Pi_{\Pi}}{a} - (a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) = 0$	$\left\{ \frac{(\Pi_{\Pi} - ay_n) \cdot K_2^x}{(K_1^x)^3} \right\}^{1/3}$ $K_1^x = \frac{\Pi_{\Pi} - ay_{\Pi}}{t_{\text{ост}}^3}$ $K_2^x = aK_2$	$\frac{t_{\text{ост}}^2}{a^2} \left[\frac{D(a_0)}{a_0^2} + \frac{D(a_1)}{a_1^2} + \frac{D(a_2)}{a_2^2} + \frac{D(K_2^x)}{(K_2^x)^2} \right]$ $D\{K_2^x\} = a^2 D\{K_2\}$	$\frac{t_{\text{ост}}^{2(1-\alpha)}}{a^2} \times \frac{\sigma_E^2}{(K_1^x)^2}$
ТС 1.4	<p>Один прямой параметр $x(t)$, несколько косвенных $y_i(t)$</p> $x(t) = \sum_{i=1}^N a_i y_i(t) + E$ $m_{y_i}(t) = K_{1i} \cdot t^{\alpha}$ $D_{y_i}(t) = K_{2i} \cdot t^{\alpha}$	$\left\{ \frac{(\Pi_{\Pi} - \sum_{i=1}^N a_i y_i(t_n))}{K_1^x} \right\}^{1/\alpha}$ $K_1^x = \sum_{i=1}^N a_i K_{1i}$	$\left\{ \frac{(\Pi_{\Pi} - \sum_{i=1}^N a_i y_i(t_n)) K_2^x}{(K_1^x)^3} \right\}^{1/\alpha}$ $K_2^x = \sum_{i=1}^N a_i^2 K_{2i}$	$\frac{t_{\text{ост}}^2}{a^2} \cdot \frac{D\{K_1^x\}}{(K_1^x)^2}$ $D\{K_1^x\} = \sum_{i=1}^N a_i^2 D\{K_{1i}\}$	$\frac{t_{\text{ост}}^{2(1-\alpha)}}{a^2} \times \frac{\sigma_E^2}{(K_1^x)^2}$

Шифр ситуации	Соотношения между прямыми и косвенными параметрами. Вид $m_y(t)$, $D_y(t)$	$t_{\text{ост}}$	$D\{t_{\text{ост}}\}$		
			D_1	D_2	D_3
1	2	3	4	5	6
ТС 2.1	<p>Один косвенный параметр $y(t)$, один прямой $x(t)$</p> $x = ay(t)^\beta + E$ $m_y(t) = K_1 \cdot t^\alpha$ $D_y(t) = K_2 \cdot t^\alpha$ $y_n = y(t_n)$	<p>Формула по определению $t_{\text{ост}}$ для ТС 1.1, a определяется при минимизации квадратичной формы</p> $\min_a \sum_{i=1}^N [x_i - ay^\beta(t_i)]$ <p>$x_i, y(t_i)$ — измерение одновременно значения косвенного и прямого параметра</p> <p>Примечание. Если измерений $y(t_i)$ значительно больше, чем измерений $x(t_i)$, то минимизируется сумма</p> $\sum_{i=1}^N \left[x_i - aK_1 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\beta-1} t_i \right]^2$	Формула по определению D_1 для ТС 1.1	Формула по определению D_2 для ТС 1.1	$\frac{t_{\text{ост}}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2} \times$ $\times \frac{\sigma_E^2 + \sigma_a^2 y_n^{2\beta}}{(K_1^x)^2}$ <p>σ_a^2 — дисперсия a при минимизации квадратичной формы</p>

Шифр ситуации	Соотношения между прямыми и косвенными параметрами. Вид $m_y(t)$, $D_y(t)$	$t_{ост}$	$D\{t_{ост}\}$		
			D_1	D_2	D_3
1	2	3	4	5	6
ТС 2.2	<p>Один косвенный параметр, один прямой</p> $x(t) = ay + by^\beta + E$ $m_y(t) = K_1 \cdot t^\alpha$ $D_y(t) = K_2 \cdot t^\alpha$	<p>Формула по определению $t_{ост}$ для ТС 1.2. Известные a и b определяются при минимизации суммы</p> $\min_{a,b} \sum_{i=1}^N [x_i - ay(t_i) - bx^\beta(t_i)]^2$ <p>для большого числа измерений прямого параметра $x(t)$</p> $\min_{a,b} \sum_{i=1}^N \left\{ x_i - \left[aK_1 + bK_1 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\beta-1} t_i \right] \right\}^2$ <p>для малого числа измерений прямого параметра $x(t)$</p>	Формула по определению D_1 для ТС 1.2	Формула по определению D_2 для ТС 1.2	$\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2} \times$ $\times \frac{[\sigma_E^2 + \sigma_a^2 y_{п}^2 + \sigma_b y_{п}^2]^\beta}{(K_1^x)^2}$ $\frac{+ \sigma_b y_{п}^2]^\beta}{(K_1^x)^2}$ <p>σ_a^2, σ_b^2 — дисперсия a и b, полученные при минимизации квадратичной формы</p>

Шифр ситуации	Соотношения между прямыми и косвенными параметрами. Вид $m_y(t)$, $D_y(t)$	$t_{\text{ост}}$	$D\{t_{\text{ост}}\}$		
			D_1	D_2	D_3
1	2	3	4	5	6
ТС 2.3		Формула по определению $t_{\text{ост}}$ для ТС 1.4	Формула по определению D_1 для ТС 1.4	Формула по определению D_2 для ТС 1.4	$\frac{t_{\text{ост}}^{2(1-a)}}{\alpha^2(K_1^x)^2} \times$ $\times [\sigma_E^2 +$ $+ \sum_{i=1}^N \sigma^2(a_i)y_i(t_n)]$ $\sigma^2(a_i)$ дисперсии, полученные при минимизации квадратичной формы
ТС 3.1	$x(t) = \sum_{i=1}^N a_i y_i(t) + E$ $m_{yi}(t) = K_{1i} \cdot t^\alpha$ $D_{yi}(t) = K_{2i} \cdot t^\alpha$	Неизвестные $\{a_i\}$ определяются при минимизации квадратичной формы $\min \sum_{j=1}^n [x_j - \sum_{i=1}^N a_i y_j(t_j)]^2$ для большего числа измерений $x(t)$ $\min \sum_{j=1}^n [x_j - \sum_{i=1}^N a_i K_{1i} t_j]^\alpha$, для малого числа измерений $x(t)$			

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ,
ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЯХ**

Для оценивания показателей надежности индивидуальных изделий широко используются косвенные параметры, которые часто заносятся в НТД. В частности, для двигателя внутреннего сгорания номенклатура косвенных параметров технического состояния установлена государственным стандартом [1]. Использование косвенных параметров при прогнозировании моментов наступления предельного состояния имеет целый ряд преимуществ по сравнению с прогнозированием по прямым параметрам:

возможность многократных периодических измерений косвенных параметров,

использование результатов замеров косвенных параметров аналогичных изделий,

возможность моделирования косвенных параметров.

сопоставимость при измерениях множества косвенных параметров.

Однако прогноз по косвенным параметрам может привести к появлению дополнительных погрешностей в связи с неполным их описанием технического состояния объекта по сравнению с прямыми.

Прогноз по косвенным параметрам возможен при наличии двух видов информации относительно изменения технического состояния исследуемого объекта:

информация о связи (детерминированной или стохастической) между косвенными и прямыми параметрами,

информация о статистических моделях изменения во времени прямых и косвенных параметров.

Исследования, проведенные в ряде работ, например [2], [3], [4] относительно первого вида информации позволили выявить наиболее распространенные соотношения между косвенными y_i и прямыми параметрами x_i . Обычно это линейно степенные зависимости

$$x_i = \sum_{j=1}^N a_j y_j^{\beta}$$

с известными или неизвестными коэффициентами $\{a_i\}$.

Относительно второго вида информации наиболее распространенной моделью изменения $\{x_i(t)\}$, $\{y_i(t)\}$ является модель вида

$$x(t) = Vt^{\alpha} + \xi,$$

где V , α — неизвестные постоянные коэффициенты; ξ — случайный процесс отклонения фактических значений параметра от гладкой аппроксимирующей кривой.

Математическое ожидание процесса ξ нулевое.

Эта модель положена в основу изменения косвенных и прямых параметров технического состояния составных частей тракторов и сельскохозяйственных машин [5], [6]. Расчет остаточного ресурса и особенно дисперсии остаточного ресурса по этой модели в общем виде затруднен. Наиболее простые формулы получают при

$$\frac{\sigma_{\xi}}{\bar{\Pi}_n} < 0,05.$$

Кроме того, для этой модели затруднен анализ процесса формирования случайного процесса ξ , необходимый при расчете дисперсии оценки остаточного ресурса и распределения оценки, так как при расчете дисперсии, например, желательно учитывать, какой вклад в разброс ресурса дадут погрешности

измерения $x(t)$, погрешности определения параметров V и α , погрешности, связанные с внутренней статистической природой случайного изменения косвенных и прямых параметров.

Поэтому в последнее время интенсивно исследуются модели изменения параметров технического состояния в виде случайных процессов с независимыми приращениями [7]—[13]. Рассматриваются как монотонные, так и немонотонные процессы.

Основное преимущество таких моделей, построенных в развитие указанной в [5], [6], состоит в том, что удается рассчитать параметры остаточного ресурса (математическое ожидание и дисперсию) через параметры случайного процесса, которые обычно меняются по степенной зависимости во времени.

В зависимости от ситуации, распределения остаточного ресурса описываются табличными распределениями (гамма-распределение, нормальное, Вейбулла, Бернштейна, диффузионное и другие).

При этом используемая модель в [2], [3] является частным случаем более общей модели с независимыми приращениями (например для случая, когда σ_{ξ} много больше дисперсии, связанной с неоднородностью случайных приращений процесса).

В основе методов оценивания математического ожидания и дисперсии процессов с независимыми приращениями положены методы [14], при нелинейном преобразовании процессов с независимыми приращениями использовано представление их в виде пуассоновской последовательности [7]. Основные соотношения для расчета остаточного ресурса и дисперсии проанализированы в [10], [11]. Примеры типовых ситуаций, изложенные в приложении 3, взяты из работ [2], [3], [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 23435—79. Техническая диагностика. Двигатели внутреннего сгорания — поршневые. Номенклатура диагностических параметров.
2. Васильев Б. В., Кофман Д. И., Эренбург С. Г. Диагностирование технического состояния судовых дизелей. — М.: Транспорт, 1982. — 143 с.
3. Петров И. В. Диагностирование строительного-дорожных машин. — М.: Транспорт, 1980. — 243 с.
4. Ждановский Н. С., Николаенко А. В. Надежность и долговечность автотранспортных двигателей. — Л.: Колос, 1981. — 295 с.
5. ГОСТ 21571—76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин.
6. Млихин В. М. Методические указания по прогнозированию технического состояния машин. — М.: ОНТИ ГОСНИТИ, 1972. — 61 с.
7. Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов. — М.: Сов. радио, 1966. — 166 с.
8. Кордонский Х. Б., Фридман Я. Ф. Некоторые вопросы вероятностного описания усталостной долговечности (Обзор). — Заводская лаборатория, 1976, № 3, с. 829—847.
9. Игнатов В. А., Комаров А. К. Оценка параметров случайного процесса износа при постепенных отказах изделий. — Вестник машиностроения, 1972, № 2.
10. Костецкий Б. И., Стрельников В. П., Тацкий В. Г. Марковская модель износа и прогнозирования долговечности изнашиваемых деталей. Проблемы трения и изнашивания. — Киев: Техника, 1976, с. 10—15.
11. Стрельников В. П. Модели отказов механических объектов. — Киев: Знание, 1982. — 19 с.
12. Болотин В. В., Ермоленко А. Ф., Синяшек М. Н. О распределении долговечности при случайных циклических нагрузках. — Машиноведение, 1979, № 3, с. 46—52.
13. Болотин В. В. О прогнозировании надежности и долговечности машин. — Машиноведение, 1977, № 5, с. 86—93.

14. Рекомендации по использованию дополнительной информации для сокращения времени испытаний на надежность. — Горький: ВНИИНМАШ, 1973. — 93 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Справочное

ПРИМЕРЫ ТИПОВЫХ СИТУАЦИЙ

ТС 1.1. Изделие: цилиндро-поршневая группа трактора МТЗ-50.

Прямой параметр-величина зазора одного из элементов цилиндро-поршневой группы x .

Косвенный параметр-величина ударного импульса виброакустического сигнала y .

Функциональная связь известна

$$x[1,66(1+K_B)]^{-3/2} \cdot (n \cdot m_D \cdot \lambda_K \cdot F \cdot P_c)^{-1/2} \cdot y^{3/2},$$

где K_B — коэффициент восстановления; n — частота вращения коленчатого вала; m_D — масса частей, участвовавших в перемещении поршня; λ_K — отношение радиуса кривошипа к длине шатуна; F — площадь поршня; P_c — давление конца сжатия.

Математическое ожидание косвенного параметра $K_1 t^\alpha$, дисперсию $K_2 t^\alpha$ и величину α определяют по результатам периодических измерений косвенных параметров согласно приложению 3.

ТС 1.4. Прямой параметр x :

мощность двигателя.

Косвенные параметры y_i :

y_1 — угол опережения начала подачи топлива;

y_2 — цикловая подача топлива;

y_3 — давление начала подъема иглы форсунки в связи с изменением затяжки пружины.

Для двигателей Д-50 известно соотношение

$$x = 3,836 + 0,156y_1 + 110,8y_2 - 0,004y_3.$$

ТС 3. Пример приведен в приложении 4.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Рекомендуемое

ОЦЕНИВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ, ДИСПЕРСИИ
И ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕПЕНИ α ПРОЦЕССА,
ОПИСЫВАЮЩЕГО ИЗМЕНЕНИЕ КОСВЕННОГО ПАРАМЕТРА

Косвенный параметр представляется в виде нестационарного случайного процесса с независимыми приращениями, математическое ожидание $m(t)$ и дисперсия $D\{t\}$ имеют вид полиномов.

Например, среднее значение для расхода смазочного масла дизеля 124НС 18/20 имеет вид [4]

$$m(t) = 3,52 + 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot t^2.$$

Среднее значение изменения параметров технического состояния составных частей тракторов и сельскохозяйственных машин имеет вид [6]

$$m(t) = Vt^\alpha, \quad 0,8 \leq \alpha \leq 2.$$

Степень полинома для дисперсии обычно не превышает максимальную степень полинома для математического ожидания.

Соотношения для оценивания $m(t)$ и $D\{t\}$

Номер	Вид $m(t)$, $D\{t\}$	Оценка $m(t)$, $D\{t\}$
1	2	3
1	$m(t) = K_1 \cdot t^\alpha$ $D\{t\} = K_2 \cdot t^\alpha$ $K_1, K_2 - \text{const}$	$K_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y_{i-1})}{(\Delta t)^\alpha}, \quad D\{K_1\} = \frac{K_2}{n \cdot (\Delta t)^\alpha} + \frac{\sigma^2}{n \cdot (\Delta t)^{2\alpha}}$ $K_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y_{i-1})^2}{(\Delta t)^\alpha},$ <p>$D\{K_1\}$ — дисперсия оценки K_1</p>
2	$m(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$ $D(t) = K_2 t^3$	<p>Оценки a_0, a_1, a_2, a_3 определяются при минимизации квадратичной формы</p> $\min_{a_0, a_1, a_2, a_3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{y_i - y_{i-1} - a_0 - a_1 \Delta t - a_2 (\Delta t)^2 - a_3 (\Delta t)^3\}^2$ $K_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y_{i-1})^2}{(\Delta t)^3}$

Соотношения для оценивания α

Номер	Исходные данные.	Оценки α
1	Результаты измерений y_i Δt — периодичность измерений	$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K \frac{(z_i - z_{i-1})}{\ln t_i - \ln (t_i - \Delta t)}, \text{ где } z_i = \ln y_i$
2	Оценки K_1, K_2 в зависимости $m(t) = K_1 t^\alpha, D(t) = K_2 t^\alpha$ V — коэффициент вариации ресурса на предельном уровне Π_n (начальное значение $y(t)$ нулевое)	$\alpha = \frac{\ln \frac{K_2}{K_1 - \Pi_n}}{2 \ln V}$
3	Моменты отказов изделий t_1, \dots, t_K по косвенному параметру $y(t)$ на предельном уровне Π_n . Результаты измерений y_e ($e=1, \dots, m$) для m изделий в два произвольные момента времени $t_i, t_j, i > j$	$\alpha = \frac{\ln \left\{ \frac{\Pi_n - \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m y_l(t_j)}{\frac{1}{m} \sum_{l=1}^m [y_l(t_i) - y_l(t_j)]} \right\}}{\ln \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_i}{t_i - t_j}}$
4	Моменты отказов изделий t_1, \dots, t_K по косвенному параметру на предельном уровне Π_n . В произвольный момент времени t коэффициент вариации процесса $V_y(t)$ (начальное значение процесса — нулевое)	$\alpha = \frac{2 \ln [V_y(t) \cdot (\Pi_n - y(0))]}{\ln \left[\frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_i \cdot \frac{1}{K-1} \sum_{j=1}^K (t_i - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_i)}{t} \right]}$ $y(0)$ — среднее начальное значение косвенного параметра

При оценивании $m(t)$ и $D\{t\}$ могут встретиться различные случаи. Формулы для оценки представлены в табл. 1, где введены следующие обозначения:

- $n+1$ — число измерений косвенного параметра,
- Δt — периодичность измерения,
- y_i — измеренное значение косвенного параметра в момент $t = i \cdot \Delta t$,

σ^2 — дисперсия погрешности измерения.

Оценивание показателя степени α производится для случая изменения математического ожидания $m(t)$ по закону

$$m(t) = K_1 t^\alpha.$$

Соотношения для оценивания α представлены в табл. 2.

При выводе соотношений для № 2, 3, 4 было учтено, что моменты отказов для изделия с косвенным параметром в виде монотонного процесса с независимыми приращениями, подчинены гамма- или функциональному гамма-распределению, среднее значение \bar{t} и дисперсия $D\{t\}$ вычисляются через параметры процесса K_1, K_2 по формулам:

$$\bar{t} = \left[\frac{\Pi_n - y(0)}{K_1} \right]^{1/\alpha}; \quad D\{t\} = \left[\frac{[\Pi_n - y(0)] \cdot K_2}{K_1^3} \right]^{1/\alpha},$$

где Π_n — предельный уровень параметра $y(t)$; $y(0)$ — начальное значение параметра (после приработки).

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Справочное.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ

ТС 3. Необходимо определить остаточный ресурс цилиндропоршневой группы в условиях стендовых форсированных испытаний. Предельное состояние определяется величиной зазора канавки по высоте верхнего уплотнительного кольца. Максимальное значение зазора равно 500 мкм.

Прямой параметр (Δ) — величина (Δ^* — величина зазора) износа, косвенные параметры (G, V) — величины расхода масла на угар и величина объема газов, прорывающихся в картер.

Результаты периодических измерений Δ^*, G, V в процессе стендовых форсированных испытаний представлены на рис. 1, 2, 3.

Обработка результатов, согласно приложению 3, позволила найти основные параметры: математическое ожидание m и дисперсию D для каждого из Δ, G, V (для Δ^* и G вычтены начальные значения):

$$\begin{aligned} m_\Delta &= c_1^\Delta t + c_2^\Delta \cdot t^{1,3}, & c_1^\Delta &= 0,66, & c_2^\Delta &= 0,97, \\ m_G &= c_1^G t + c_2^G \cdot t^{1,81}, & c_1^G &= 0,83, & c_2^G &= 0,7, \\ m_V &= c_1^V t + c_0^V, & c_1^V &= 1,8, & c_0^V &= 120, \end{aligned}$$

$$D_\Delta(t) = a^\Delta \cdot t, \quad a^\Delta = 35,$$

$$D_G(t) = a^G \cdot t, \quad a^G = 30,$$

$$D_V(t) = a^V \cdot t, \quad a^V = 2.$$

Регрессионная зависимость между Δ , G , V ищется в виде

$$\Delta^{1/1,3} = c_1 \cdot G^{1/1,81} + c_2 V + c_3 + E.$$

Неизвестные коэффициенты c_1 , c_2 , c_3 определяются при минимизации квадратичной формы

$$\min_{c_1, c_2, c_3} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \left[c_1 \cdot G_{ij}^{1/1,81} + c_2 V_{ij} + c_3 - (c_1^\Delta \cdot t_i + c_2^\Delta \cdot t_i^{1,3})^{1/1,3} \right]^2.$$

i — соответствует измерению в t_i , j — номер изделия.

Используя результаты обучающего эксперимента, на рис. 1, 2, 3 получим:

$$c_1 = 2,43, \quad c_2 = 0,03, \quad c_3 = 4,58.$$

Рассчитанные по регрессионной зависимости значения Δ для двух моментов времени $t = 60, 70$ час отмечены звездочками. Дисперсия σ_E^2 равна 400 мкм^2 .

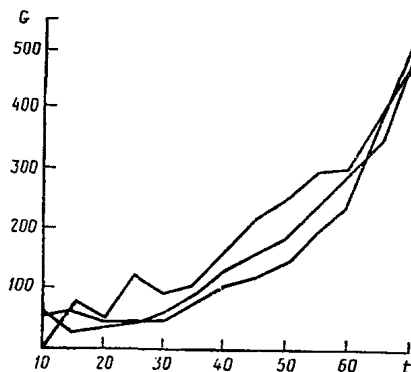


Рис. 1. Реализация процесса изменения расхода масла G

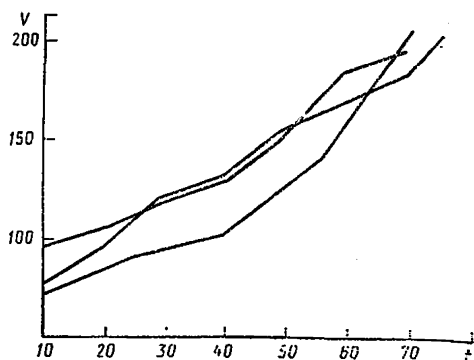


Рис. 2 Реализация процесса изменения прорыва газов в характер V

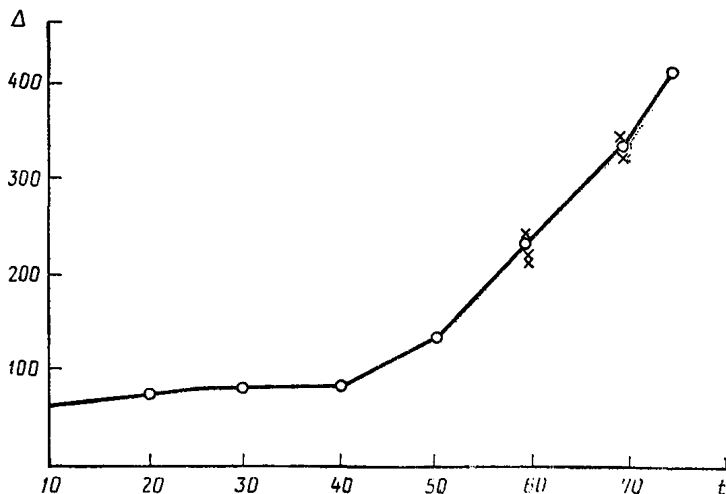


Рис. 3 Изменение зазора во времени

При расчете остаточного ресурса для исследуемой цилиндрично-поршневой группы могут встретиться две ситуации:

1. Для величины износа Δ параметры c_1^Δ , c_2^Δ , a^Δ известны.

Значение Δ_n после наработки t_n неизвестно, его необходимо определить по регрессии.

Например,

$$\begin{aligned} t_n &= 60 \text{ ч,} \\ G_n &= 280, \\ V_n &= 170, \\ \Delta_n &= 200 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

Величина остаточного ресурса $t_{\text{ост}}$ находится как корень уравнения

$$500 - c_1^\Delta t_{\text{ост}} - c_2^\Delta \cdot t_{\text{ост}}^{1,3} - \Delta_0 - \Delta_n = 0.$$

Для приведенных значений c_1 , c_2 , Δ_n $t_{\text{ост}} \approx 22$.

При расчете дисперсии остаточного ресурса учитывается факт, что основной вклад в разброс $t_{\text{ост}}$ дает величина ε и погрешность измерения, т. е. дисперсия $D\{t_{\text{ост}}\}$ рассчитывается по формуле

$$D\{t_{\text{ост}}\} = D_1 + D_3,$$

$$D_1 = \frac{[\Pi_n - \Delta_n] \cdot a^\Delta}{(K_1^*)^3}, \quad K_1^* = \frac{\Pi_n - \Delta_n}{t_{\text{ост}}^3},$$

$$D_3 = \frac{\sigma_E^2}{(K_1^*)^2}.$$

2. Для величины износа параметры c_1^Δ , c_2^Δ , a^Δ неизвестны. Производя периодические измерения косвенных параметров G и V , делаются по полученной регрессионной зависимости расчеты значений износа в эти же моменты времени $\Delta(t_i)$. Обработывая результаты расчетов $\Delta(t_i)$ методами приложения 3, рассчитываются неизвестные коэффициенты, входящие в математическое ожидание и дисперсию процесса износа.

Величина остаточного ресурса рассчитывается по формуле предыдущего случая.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения	1
2. Математическая модель объекта для прогнозирования остаточного ресурса. Описание типовых ситуаций	2
3. Расчет остаточного ресурса	4
<i>Приложение 1.</i> Справочное. Теоретическое обоснование методов прогнозирования остаточного ресурса по косвенным параметрам, используемых в методических указаниях	11
<i>Приложение 2.</i> Справочное. Примеры типовых ситуаций	13
<i>Приложение 3.</i> Рекомендуемое. Оценивание математического ожидания, дисперсии и показателя степени α процесса, описывающего изменение косвенного параметра	13
<i>Приложение 4.</i> Справочное. Пример расчета остаточного ресурса по косвенным параметрам	16

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**Техническая диагностика.
Прогнозирование остаточного ресурса машин и деталей
по косвенным параметрам**

РД 50—490—84

Редактор *Т. А. Киселева*
Технический редактор *О. Н. Никитина*
Корректор *В. С. Черная*

Сдано в наб. 07.08.85 Подп. к печ. 06.12.85 Т—19749 Формат 60×90^{1/16} Бумага типографская № 1 Гарнитура литературная Печать высокая 1,25 усл. печ. л. 1,5 усл. кр.-отг. 1,27 уч.-изд. л. Тир. 1500 Изд. № 8343/4 Зак. 2830 Цена 10 коп.

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123840, Москва, ГСП,
Новопресненский пер., 3.
Калужская типография стандартов, ул. Московская, 256.