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

gost.e-ecolog.ru

**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. Важдаев**; **П. Ш. Петросян**; **Ю. С. Борисов**; **В. Ю. Лимарь**; **Ю. Л. Калинкин**

**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**

УДК 620.19:621

РУКОВОДЯЩИЙ НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ

# 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

© Издательство стандартов, 1985

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 ($x_1$, ..., $x_r$),

результатами измерения ($z_1$, ..., $z_l$) косвенных параметров ($y_1$, ..., $y_e$) описывается посредством регрессионных зависимостей

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

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

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

2.2. Косвенные параметры $y_1$, ..., $y_l$ 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 $t^\alpha$, где показатель $\alpha$ 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 $F_i$ ($z_1$, ..., $z_l$, $a_{i1}$, ..., $a_{il}$), все коэффициенты $a_{ij}$ ($i=1, \ldots, r$; $j=1, \ldots, l$), дисперсии $\sigma_i^2$ известны,

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

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

вид функций $F_i$ ($z_1$, ..., $z_l$, $a_{i1}$, ..., $a_{il}$) 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 $F_i$ ($z_1$, ..., $z_l$; $a_{i1}$, ..., $a_{il}$) 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 $t_{ост}$ , $D\{t_{ост}\}$ для основных типовых ситуаций приведены в таблице, где использованы следующие обозначения:

$П_п$ — предельное значение прямого параметра при нулевом номинальном значении;

$y_п$ — значение косвенного параметра $y(t)$ после выработки ресурса $t_п$ .

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

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

$$D\{t_{ост}\}=D_1+D_2+D_3.$$

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

Для более сложных нелинейных соотношений

$$x_i=F_i\,(z_1,...,z_l;\ a_{i1},...,a_{il})+E_i$$

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

$$D_1<<D_2,\ D_3.$$

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

$$П_{п_i}-F_i\,(K_{11}\cdot t^{\alpha_1},\ K_{12}\cdot t^{\alpha_2},...,K_{1l}\cdot t^{\alpha_l},\ a_{i1},...,a_{il})=0 \qquad (2)$$

где $K_{1i}$, $\alpha_i$ — 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

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

где $t_{ост}$ — функция, зависящая от $П_{п_i}$ ; $K_{11}$, ..., $K_{1l}$ ; $\alpha_1$, ..., $\alpha_l$, 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 | Один косвенный параметр $y(t)$, один прямой $x(t)$<br><br>$x=a\cdot y^{\beta}(t)+E$<br>$m_y(t)=K_1\cdot t^{\alpha}$<br>$D_y(t)=K_2\cdot t^{\alpha}$<br>$y_n=y(t_n)$ | $\left\{\frac{П_п-ay_п^{\beta}}{K_1^x}\right\}^{1/\alpha}$<br><br>$K_1^x=aK_1\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{\beta-1}$ | $\left\{\frac{(П_п-ay_п^{\beta})K_2^x}{(K_1^x)^3}\right\}^{1/\alpha}$<br><br>$K_2^x=a^2K_2\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{2\beta-2}$ | $\frac{t_{ост}^2}{\alpha^2}\cdot\frac{D\{K_1^x\}}{(K_1^x)^2}$<br><br>$D\{K_1^x\}=$<br>$=\frac{a^2(\beta-1)^2\cdot K_2^{2(\beta-2)}}{K_1^{\beta-2}}\times$<br>$\times D\{K_2\}+$<br>$+\frac{a^2(2-\beta)^2K_2^{2(\beta-2)}}{K_1^{2(\beta-3)}}\times$<br>$\times D\{K_1\}$ | $\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2}\times$<br>$\times\frac{\sigma_E^2}{(K_1^x)^2}$ |

*Продолжение*

| 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 | Один косвенный параметр $y(t)$ и один прямой $x(t)$<br><br>$x(t)=ay+by^{\beta}+E$<br>$m_y(t)=K_1\cdot t^{\alpha}$<br>$D_y(t)=K_2\cdot t^{\alpha}$ | $\left\{\frac{П_п-ay_п-by_п^{\beta}}{K_1^x}\right\}^{1/\alpha}$<br><br>$K_1^x=aK_1+bK_1\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{\beta-1}$ | $\left\{\frac{(П_п-ay_п-by_п^{\beta})K_2}{(K_1^x)^3}\right\}^{1/\alpha}$<br><br>$K_2^x=\left[a\frac{K_2}{K_1}+b\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{\beta-1}\right]^2K_2$ | $\frac{t_{ост}^2}{\alpha^2}\cdot\frac{D\{K_1^x\}}{(K_1^x)^2}$<br><br>$D\{K_1^x\}=$<br>$=\frac{b^2(\beta-1)^2\cdot K_2^{2(\beta-2)}}{K_1^{(\beta-2)2}}\times$<br>$\times D\{K_2\}+$<br>$+\left[\frac{b^2(2-\beta)^2K_2^{2(\beta-1)}}{K_1^{2(\beta-1)}}+\right.$<br>$\left.+a^2\right]\cdot D\{K_1\}$ | $\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2}\times$<br>$\times\frac{\sigma_E^2}{(K_1^x)^2}$ |

*Продолжение*

| 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 1.3 | Один косвенный параметр, один прямой<br>$x(t)=ay(t)+E$<br>$m_y(t)=a_0+a_1t+$<br>$+a_2t^2+a_3t^3$<br>$D_y(t)=K_2\cdot t^3$ | Оценка величины $t_{ост}$ находится из решения уравнения<br>$\frac{П_п}{a}-(a_0+a_1t+a_2t^2+$<br>$+a_3t^3)=0$ | $\left\{\frac{(П_п-ay_n)\cdot K_2^x}{(K_1^x)^3}\right\}^{1/3}$<br>$K_1^x=\frac{П_п-ay_п}{t_{ост}^3}$<br>$K_2^x=aK_2$ | $\frac{t_{ост}^2}{\alpha^2}\left[\frac{D(a_0)}{a_0^2}+\frac{D(a_1)}{a_1^2}+\right.$<br>$\left.+\frac{D(a_2)}{a_2^2}+\frac{D(K_2^x)}{(K_2^x)^2}\right]$<br>$D\{K_2^x\}=a^2D\{K_2\}$ | $\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2}\times$<br>$\times\frac{\sigma_E^2}{(K_1^x)^2}$ |
| ТС 1.4 | Один прямой параметр $x(t)$, несколько косвенных $y_i(t)$<br>$x(t)=\sum_{i=1}^{N}a_iy_i(t)+E$<br>$m_{yi}(t)=K_{1i}\cdot t^{\alpha}$<br>$D_{yi}(t)=K_{2i}\cdot t^{\alpha}$ | $\left\{\frac{(П_п-\sum_{i=1}^{N}a_iy_i(t_n))}{K_1^x}\right\}^{1/\alpha}$<br>$K_1^x=\sum_{i=1}^{N}a_iK_{1i}$ | $\left\{\frac{(П_п-\sum_{i=1}^{N}a_iy_i(t_n))K_2^x}{(K_1^x)^3}\right\}^{1/\alpha}$<br>$K_2^x=\sum_{i=1}^{N}a_i^2K_{2i}$ | $\frac{t_{ост}^2}{\alpha^2}\cdot\frac{D\{K_1^x\}}{(K_1^x)^2}$<br>$D\{K_1^x\}=\sum_{i=1}^{N}a_i^2D\{K_{1i}\}$ | $\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2}\times$<br>$\times\frac{\sigma_E^2}{(K_1^x)^2}$ |

*Продолжение*

| 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 2.1 | Один косвенный параметр $y(t)$, один прямой $x(t)$<br><br>$x=ay(t)^{\beta}+E$<br>$m_y(t)=K_1\cdot t^{\alpha}$<br>$D_y(t)=K_2\cdot t^{\alpha}$<br>$y_n=y(t_n)$ | Формула по определению $t_{ост}$ для ТС 1.1, $a$ определяется при минимизации квадратичной формы<br><br>$\min\limits_{a}\sum\limits_{i=1}^{N}[x_i-ay^{\beta}(t_i)]$<br>$x_i$, $y(t_i)$ — измерение одновременно значения косвенного и прямого параметра<br>Примечание. Если измерений $y(t_i)$ значительно больше, чем измерений $x(t_i)$, то минимизируется сумма<br>$\sum\limits_{i=1}^{N}\left[x_i-aK_1\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{\beta-1}t_1\right]^2$ | Формула по определению $D_1$, для ТС 1.1 | Формула по определению $D_2$ для ТС 1.1 | $\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2}\times$<br>$\times\frac{\sigma_E^2+\sigma_a^2 y_n^{2\beta}}{(K_1^x)^2}$<br><br>$\sigma_a^2$ — дисперсия $a$ при минимизации квадратичной формы |

*Продолжение*

| 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 | Один косвенный параметр, один прямой<br>$x(t)=ay+by^{\beta}+E$<br>$m_y(t)=K_1\cdot t^{\alpha}$<br>$D_y(t)=K_2\cdot t^{\alpha}$ | Формула по определению $t_{ост}$ для ТС 1.2. Неизвестные $a$ и $b$ определяются при минимизации суммы<br>$\min\limits_{a,b}\sum\limits_{i=1}^{N}[x_i-ay(t_i)-bx^{\beta}(t_i)]^2$<br>для большого числа измерений прямого параметра $x(t)$<br>$\min\limits_{a,b}\sum\limits_{i=1}^{N}\left\{x_i-\left[aK_1+bK_1\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{\beta-1}\right]t_i\right\}^2$<br>для малого числа измерений прямого параметра $x(t)$ | Формула по определению $D_1$ для ТС 1.2 | Формула по определению $D_2$ для ТС 1.2 | $\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2}\times\times\frac{[\sigma_E^2+\sigma_a^2y_п+(K_1^x)^2}{+\sigma_by_п^2]^{\beta}}{(K_1^x)^2}$<br>$\sigma_a^2$, $\sigma_b^2$ — дисперсия $a$ и $b$, полученные при минимизации квадратичной формы |

*Продолжение*

| 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 2.3 | | Формула по определению $t_{ост}$ для ТС 1.4 | Формула по определению $D_1$ для ТС 1.4 | Формула по определению $D_2$ для ТС 1.4 | $\frac{t_{ост}^{2(1-\alpha)}}{\alpha^2 (K_1^x)^2} \times$ $\times [\sigma_E^2 +$ $+ \sum_{i=1}^{N} \sigma^2(a_i) y_i(t_n)]$ |
| 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 $\min_{a_i} \sum_{j=1}^{n} [x_j - \sum_{i=1}^{N} a_i y_j(t_j)]^2$ для большего числа измерений $x(t)$ $\min_{a_i} \sum_{j=1}^{n} [x_j - \sum_{i=1}^{N} a_i K_{1i} t_j]^2$, для малого числа измерений $x(t)$ | | | $\sigma^2(a_i)$ дисперсии, полученные при минимизации квадратичной формы |

*ПРИЛОЖЕНИЕ 1*
*Справочное*

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ 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 $y_l$ и прямыми параметрами $x_l$. Обычно это линейно степенные зависимости

$$x_l = \sum_{j=1}^{N} a_l y_j^{\beta}$$

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

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

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

где $V$, $\alpha$ — неизвестные постоянные коэффициенты; $\xi$ — случайный процесс отклонения фактических значений параметра от гладкой аппроксимирующей кривой.

Математическое ожидание процесса $\xi$ 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

$$\frac{\sigma_\xi}{\overline{T}_п} < 0{,}05.$$

Кроме того, для этой модели затруднен анализ процесса формирования случайного процесса $\xi$, 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 $\alpha$, 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 $\sigma_\xi$ 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 строительно-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. Михлин 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., Таций В. Г. Марковская модель износа и прогнозирование 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., Синящек 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

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

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

Математическое ожидание косвенного параметра $K_1t^\alpha$, дисперсию $K_2t^\alpha$ и величину $\alpha$ 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 $\alpha$ 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]

$$m(t)=3,52+0,9\cdot10^{-3}\cdot t-0,7\cdot10^{-3}\cdot t^2.$$

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

$$m(t)=Vt^\alpha,\ 0,8\leqslant\alpha\leqslant2.$$

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

Таблица 1

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

| Номер | Вид $m(t)$, $D\{t\}$ | Оценка $m(t)$, $D\{t\}$ |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | $m(t)=K_1\cdot t^{\alpha}$<br>$D\{t\}=K_2\cdot t^{\alpha}$<br>$K_1$, $K_2$—const | $K_1=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i-y_{i-1})}{(\Delta t)^{\alpha}}$, $D\{K_1\}=\frac{K_2}{n\cdot(\Delta t)^{\alpha}}+\frac{\sigma^2}{n\cdot(\Delta t)^{2\alpha}}$<br>$K_2=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i-y_{i-1})^2}{(\Delta t)^{\alpha}}$,<br>$D\{K_1\}$ — дисперсия оценки $K_1$ |
| **2** | $m(t)=a_0+a_1t+a_2t^2+a_3t^3$<br>$D(t)=K_2t^3$ | Оценки $a_0$, $a_1$, $a_2$, $a_3$ определяются при минимизации квадратичной формы<br>$\min_{a_0,a_1,a_2,a_3}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\{y_i-y_{i-1}-a_0-a_1\Delta t-a_2(\Delta t)^2-a_3(\Delta t)^3\}^2$<br>$K_2=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i-y_{i-1})^2}{(\Delta t)^3}$ |

Таблица 2

**Соотношения для оценивания $\alpha$**

| Номер | Исходные данные. | Оценки $\alpha$ |
|---|---|---|
| 1 | Результаты измерений $y_i$ $\Delta t$ — периодичность измерений | $\alpha=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{K}\frac{(z_i-z_{i-1})}{\ln t_i-\ln(t_i-\Delta t)}$, где $z_i=\ln y_i$ |
| 2 | Оценки $K_1$, $K_2$ в зависимости $m(t)=K_1t^{\alpha}$, $D\{t\}=K_2t^{\alpha}$<br>$V$ — коэффициент вариации ресурса на предельном уровне<br>$\Pi_{\text{п}}$ (начальное значение $y(l)$ нулевое) | $\alpha=\frac{\ln\frac{K_2}{K_1-\Pi_{\text{п}}}}{2\ln V}$ |
| 3 | Моменты отказов изделий $t_1,\ldots,t_K$ по косвенному параметру $y(t)$ на предельном уровне $\Pi_{\text{п}}$. Результаты измерений $y_e$ $(l=1,\ldots,m)$ для $m$ изделий в два произвольные момента времени<br>$t_i,\ t_j,\ i>j$ | $\alpha=\frac{\ln\left\{\frac{\Pi_{\text{п}}-\frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}y_l(t_j)}{\frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}[y_l(t_i)-y_l(t_j)]}\right\}}{\ln\frac{\frac{1}{K}\sum_{1}^{K}t_i}{t_i-t_j}}$ |
| 4 | Моменты отказов изделий $t_1,\ \ldots,\ t_K$ по косвенному параметру на предельном уровне $\Pi_{\text{п}}$. В произвольный момент времени $t$ коэффициент вариации процесса $V_y(t)$ (начальное значение процесса — нулевое) | $\alpha=\frac{2\ln[V_y(t)\cdot(\Pi_{\text{п}}-y(0))]}{\ln\left[\frac{\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}t_i\cdot\frac{1}{K-1}\sum_{j=1}^{K}(t_i-\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}t_i)}{t}\right]}$<br>$y(0)$ — 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,

$\Delta t$ —периодичность измерения,

$y_i$ — измеренное значение косвенного параметра в момент

$$t=i\cdot\Delta t,$$

$\sigma^2$ — дисперсия погрешности измерения.

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

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

Соотношения для оценивания $\alpha$ 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 $\overline{t}$ и дисперсия $D\{t\}$ вычисляются через параметры процесса $K_1$, $K_2$ по формулам:

$$\overline{t}=\left[\frac{П_{\text{п}}-y(0)}{K_1}\right]^{1/\alpha};\qquad D\{t\}=\left[\frac{[П_{\text{п}}-y(0)]\cdot K_2}{K_1^3}\right]^{1/\alpha},$$

где $П_{\text{п}}$ — 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 ($\Delta$) — величина ($\Delta^*$ — величина зазора) износа, косвенные параметры ($G$, $V$) — величины расхода масла на угар и величина объема газов, прорывающихся в картер.

Результаты периодических измерений $\Delta^*$, $G$, $V$ 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 $\Delta$, $G$, $V$ ($\Delta^*$ и $G$ вычтены начальные значения):

$$m_{\Delta}=c_1^{\Delta}t+c_2^{\Delta}\cdot t^{1,3},\qquad c_1^{\Delta}=0,66,\qquad c_2^{\Delta}=0,97,$$

$$m_G=c_1^G t+c_2^G\cdot t^{1,81},\qquad c_1^G=0,83,\qquad c_2^G=0,7,$$

$$m_V=c_1^V t+c_0^V,\qquad c_1^V=1,8,\qquad c_0^V=120,$$

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

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

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

Регрессионная зависимость между $\Delta$, $G$, $V$ 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 $\Delta$ для двух моментов времени $t = 60$, 70 час отмечены звездочками. Дисперсия $\sigma_E^2$ равна 400 мкм$^2$.

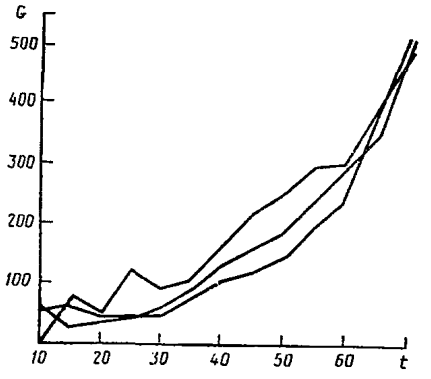


Рис. 1. Реализация процесса изменения расхода масла $G$

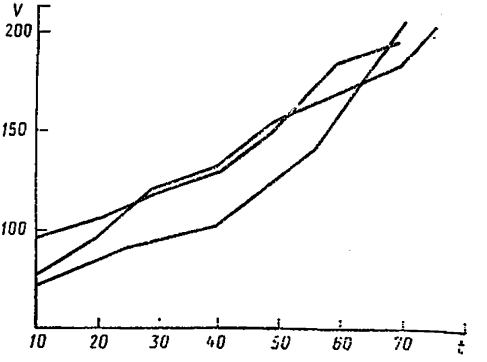


Рис. 2 Реализация процесса изменения прорыва газов в картер $V$

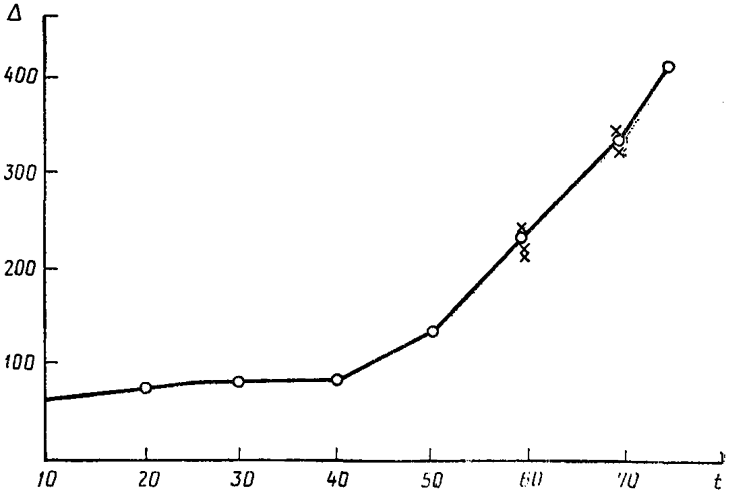


Рис. 3 Изменение зазора во времени

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

1. Для величины износа $\Delta$ параметры $c_1^{\Delta}$, $c_2^{\Delta}$ $a^{\Delta}$ известны.

Значение $\Delta_n$ после наработки $t_n$ неизвестно, его необходимо определить по регрессии.

Например,

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

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 $c_1$, $c_2$, $\Delta_n$ $t_{\text{ост}} \approx 22$.

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

$$D\{t_{\text{ост}}\}=D_1+D_3,$$

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

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

2. Для величины износа параметры $c_1^{\Delta}$ $c_2^{\Delta}$, $a^{\Delta}$ неизвестны. Производя периодические измерения косвенных параметров $G$ и $V$, делаются по полученной регрессионной зависимости расчеты значений износа в эти же моменты времени $\Delta(t_i)$. Обрабатывая 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

*Приложение 1.* Справочное. Теоретическое обоснование методов прогнозирования остаточного ресурса по косвенным параметрам, используемых в методических указаниях . . 11

*Приложение 2.* Справочное. Примеры типовых ситуаций . . . . 13

*Приложение 3.* Рекомендуемое. Оценивание математического ожидания, дисперсии и показателя степени $\alpha$ процесса, описывающего изменение косвенного параметра . . . . . 13

*Приложение 4.* 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 60×90¹/₁₆ Бумага типографская № 1 Гарнитура литературная Печать высокая 1,25 усл. печ. л. 1,5 усл. кр.-отт. 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.

gost.e-ecolog.ru