

**Володарский В.А.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ ЗАМЕН И РЕМОНТОВ ПРИ ДОПУСТИМОМ ЗНАЧЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ

Изложен метод, позволяющий при заданном уровне интенсивности отказов определять глубину восстановления безотказности, периодичность предупредительных замен и ремонтов технических устройств.

Ключевые слова: безотказность, глубина восстановления, интенсивность отказов, ремонт, замена, периодичность.

Для технических устройств (ТУ) важным параметром является безопасность, под которой понимают свойство ТУ, в случае отказа не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а так же для окружающей среды [1]. Например, на транспорте необходимым условием является обеспечение безопасности движения. Известно, что проведение предупредительных замен (ПЗ) и предупредительных ремонтов (ПР) повышает безотказность, что способствует повышению безопасности ТУ. Поэтому параметры системы предупредительных замен и ремонтов (периодичность ПЗ, периодичность и количество ПР, глубина восстановления безотказности) в этом случае должны определяться из условия обеспечения допустимого (заданного) уровня безотказности ТУ. Например, в соответствии с [2] применительно к устройствам железнодорожной автоматики и телемеханики показателем, количественно характеризующим допустимое значение безотказности, является интенсивность отказов (ИО).

Глубину восстановления безотказности в соответствии с [3] предлагается оценивать «возрастом» ТУ α в единицах наработки на отказ (ННО). Рассмотрим случай, когда после проведения n предупредительных ремонтов осуществляется замена ТУ на новое. Характер изменения ИО представлен на рис. 1. После проведения минимального аварийного ремонта (МАР) интенсивность отказов не изменяется. После проведения ПР с периодичностью x и глубиной восстановления безотказности α ИО снижается до значения $\lambda(\alpha)$, а после проведения ПЗ с периодичностью x_p – до нуля. ИО в момент проведения ПЗ и ПР составляет $\lambda(x+\alpha)$. Здесь значения x и x_p измеряются в единицах ННО, а интенсивность отказов приведена к безразмерному виду путем умножения на значение ННО.

ВБР при наработке x_p согласно рис. 1 определяется как

$$P(x_p) = P(x/a, n) = \exp\left(-\int_0^{x_p} \lambda(x) dx\right) = (P(x+\alpha))^{n+1} (P(\alpha))^{-n}, \quad (1)$$

где n – количество ремонтов между заменами.

Частные случаи выражения (1):

при $n = 0$, когда проводятся только ПЗ и $\alpha = 0$, $P(x_p) = P(x)$;

при $n \rightarrow \infty$, когда проводятся только ПР, после раскрытия неопределенности получим:

$$P(x/\alpha) = (P(x + \alpha))(P(\alpha))^{-1}. \quad (2)$$

Учитывая, что $x_p = \alpha + (n+1)x$ (см. рис. 1), получим:

$$x = (x_p - \alpha)(n+1)^{-1}. \quad (3)$$

Подставив значение x из (3) в (1), получим:

$$P(x_p) = [P\left(\frac{x_p + n\alpha}{n+1}\right)]^{n+1} [P(\alpha)]^{-n}. \quad (4)$$

Тогда ИО определяется как

$$\begin{aligned} \lambda(x_p) &= \lambda(x/\alpha, n) = -\frac{[P(x_p)]'}{P(x_p)} = \\ &= \lambda\left(\frac{x_p + n\alpha}{n+1}\right) = \lambda(x + \alpha). \end{aligned} \quad (5)$$

Частные случаи выражения (5):

при $n = 0$, когда производятся только ПЗ и $\alpha = 0$, $\lambda(x_p) = \lambda(x)$;

при $n \rightarrow \infty$, когда проводятся только ПР, получим выражение $\lambda(x/\alpha) = \lambda(x + \alpha)$,

В статье рассматривается метод определения параметров системы предупредительных замен и ремонтов при заданном уровне интенсивности отказов технических устройств, когда

$$\lambda(x/\alpha, n) \leq \lambda_g, \quad (6)$$

где λ_g – допустимое по условиям обеспечения безопасности значение интенсивности отказов.

Известно, что ПЗ и ПР целесообразно проводить для ТУ, подверженных износу и старению. Для описания отказов, связанных с износом и старением, как правило, используют нормальное, Вейбулла и гамма – распределение. Кроме того, в случае неполноты исходной информации целесообразно использовать распределение косинуса [4]. Тогда выражение (5) с учетом результатов, полученных в [4], можно представить так:

для нормального распределения

$$\lambda(x/\alpha, n) = f_1((1 - x - \alpha)v^{-1})v^{-1}; \quad (7)$$

для распределения Вейбулла

$$\lambda(x/\alpha, n) = bK_b^b(x + \alpha)^{b-1}; \quad (8)$$

для гамма-распределения

$$\begin{aligned} \lambda(x/\alpha, n) &= (m^m(x + \alpha)^{m-1}) \times \\ &\times ((m-1)! \sum_{i=0}^{m-1} (m(x + \alpha))^i / i!)^{-1}; \end{aligned} \quad (9)$$

для распределения косинуса

$$\lambda(x/\alpha, n) = \operatorname{tg}(x + \alpha), \quad (10)$$

где v – коэффициент вариации; f_1 – табулированная функция; b – параметр формы распределения Вейбулла; $K_b = \Gamma(1 + b^{-1})$. Здесь Γ – гамма-функция; m – параметр формы гамма-распределения.

Периодичность предупредительных замен x_{Pg} и ремонтов x_g , глубина восстановления безотказности α_g при заданном допустимом значении интенсивности отказов определяются из условия $\lambda(x/\alpha, n) = \lambda_g$ следующим образом.

Распределение Вейбулла.

При заданных значениях α из (8) получим:

$$x_g = (\lambda_g (bK_b^b)^{-1})^{\frac{1}{b-1}} - \alpha. \quad (11)$$

При $\alpha = 0$, когда проводится только ПЗ, из (11) получим:

$$x_{Pg} = (\lambda_g (bK_b^b)^{-1})^{\frac{1}{b-1}}. \quad (11a)$$

При заданных значениях x из (8) получим:

$$\alpha_g = (\lambda_g (bK_b^b)^{-1})^{\frac{1}{b-1}} - x. \quad (12)$$

При заданных значениях x, α и n из (8) с учетом (5) получим:

$$x_{Pg} = (n+1)(\lambda_g (bK_b^b)^{-1})^{\frac{1}{b-1}} - n\alpha. \quad (13)$$

Частные случаи выражения (13): при $n = 0$, когда $\alpha = 0$ получаем выражение (11a); при $n \rightarrow \infty$ после раскрытия неопределенности получим выражение (11).

2. Распределение косинуса.

При заданных значениях α из (10) получим:

$$x_g = \arctg \lambda_g - \alpha. \quad (14)$$

При $\alpha = 0$, когда проводятся только ПЗ, из (14) получим:

$$x_{Pg} = \arctg \lambda_g. \quad (14a)$$

При заданных значениях x из (10) получим:

$$\alpha_g = \arctg \lambda_g - x. \quad (15)$$

При заданных значениях x, α и n из (10) с учетом (5) получим:

$$x_{Pg} = (n+1)\arctg \lambda_g - n\alpha. \quad (16)$$

Частные случаи выражения (16): при $n = 0$ получим выражение (14a); при $n \rightarrow \infty$ получим выражение (14).

3. Гамма-распределение.

При заданных значениях α из (9) получим:

$$\text{при } m = 2 \quad x_g = \lambda_g (4 - 2\lambda_g)^{-1} - \alpha; \quad (17)$$

при $m = 4$

$$x_g = \left(6\lambda_g + (216\lambda_g - 36\lambda_g^2)^{0,5}\right)(54 - 18\lambda_g)^{-1} - \alpha. \quad (18)$$

При $\alpha = 0$, когда проводятся только ПЗ, получим:

$$\text{при } m = 2 \quad x_{Pg} = \lambda_g (4 - 2\lambda_g)^{-1}; \quad (17a)$$

при $m = 4$

$$x_{Pg} = \left(6\lambda_g + (216\lambda_g - 36\lambda_g^2)^{0,5}\right)(54 - 18\lambda_g)^{-1}. \quad (18a)$$

При заданных значениях x из (9) получим:

$$\text{при } m = 2 \quad \alpha_g = \lambda_g (4 - 2\lambda_g)^{-1} - x; \quad (19)$$

при $m = 4$

$$\alpha_g = \left(6\lambda_g + (216\lambda_g - 36\lambda_g^2)^{0,5}\right)(54 - 18\lambda_g)^{-1} - x. \quad (20)$$

При заданных значениях x, α и n из (9) с учетом (5) получим:

$$\text{при } m = 2 \quad x_{Pg} = (n+1)\lambda_g (4 - 2\lambda_g)^{-1} - n\alpha; \quad (21)$$

при $m = 4$

$$x_{Pg} = (n+1) \left[\left(6\lambda_g + (216\lambda_g - 36\lambda_g^2)^{0,5}\right) \times (54 - 18\lambda_g)^{-1} \right] - n\alpha. \quad (22)$$

Частные случаи выражений (21) и (22):

при $n = 0$ получим соответственно выражения (17a) и (18a);

при $n \rightarrow \infty$ получим соответственно выражения (17) и (18).

Как видно из полученных выражений периодичность предупредительных замен и ремонтов линейно зависит от глубины восстановления безотказности и, соответственно, глубина восстановления безотказности линейно зависит от периодичности предупредительных замен и ремонтов.

В качестве примера, в таблице 1 представлены значения x_g (числитель) и x_{Pg} (знаменатель), вычисленные при отдельных значениях λ_g, n и α с использованием выражений (11) и (13) в случае распределения Вейбулла при $b = 2$ и $b = 3$, выражений (14) и (16) в случае распределения косинуса, выражений (17) и (22) в случае гамма-распределения при $m = 2$ и выражений (18) и (22) в случае гамма-распределения при $m = 4$. Из таблицы видно следующее. Во-первых, с ростом параметра формы b и m (уменьшением коэффициента вариации) периодичность ПЗ и ПР увеличивается. Это означает, что когда интенсивность отказов возрастает медленнее, предупредительные замены и ремонты могут выполняться реже. Во-вторых, с уменьшением допустимого значения интенсивности отказов ТУ периодичность ПЗ и ПР уменьшается. В-третьих, с уменьшением глубины восстановления безотказности периодичность ПР уменьшается. Следовательно, с целью обеспечения безопасности предупредительный ремонт устройств целесообразно выполнять с возможно большей глубиной, поскольку при этом снижается его частота, особенно при малых значениях λ_g .

Таблица 1

Распределение		Вейбулла $b = 2$			Вейбулла $b = 3$			Косинуса			Гамма $m = 2$			Гамма $m = 4$		
λ_g, n		x_g/x_{Pg} при α			x_g/x_{Pg} при α			x_g/x_{Pg} при α			x_g/x_{Pg} при α			x_g/x_{Pg} при α		
		0	0,1	0,2	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2
1	0	$\frac{-}{0,6}$	-	-	$\frac{-}{0,7}$	-	-	$\frac{-}{0,8}$	-	-	$\frac{-}{0,5}$	-	-	$\frac{-}{0,6}$	-	-
	1	-	$\frac{0,54}{1,17}$	$\frac{0,44}{1,07}$	-	$\frac{0,58}{1,27}$	$\frac{0,49}{1,17}$	-	$\frac{0,68}{1,47}$	$\frac{0,58}{1,37}$	-	$\frac{0,4}{0,9}$	$\frac{0,3}{0,8}$	-	$\frac{0,44}{0,98}$	$\frac{0,34}{0,88}$
	3	-	$\frac{0,54}{2,25}$	$\frac{0,44}{1,95}$	-	$\frac{0,58}{2,44}$	$\frac{0,49}{2,14}$	-	$\frac{0,68}{2,84}$	$\frac{0,58}{2,54}$	-	$\frac{0,5}{1,7}$	$\frac{0,3}{1,4}$	-	$\frac{0,44}{1,85}$	$\frac{0,34}{1,55}$
	5	-	$\frac{0,54}{3,35}$	$\frac{0,44}{2,82}$	-	$\frac{0,58}{3,61}$	$\frac{0,49}{3,11}$	-	$\frac{0,68}{4,21}$	$\frac{0,58}{3,71}$	-	$\frac{0,4}{2,5}$	$\frac{0,3}{2,0}$	-	$\frac{0,44}{2,73}$	$\frac{0,34}{2,23}$
0,5	0	$\frac{-}{0,3}$	-	-	$\frac{-}{0,5}$	-	-	$\frac{-}{0,6}$	-	-	$\frac{-}{0,2}$	-	-	$\frac{-}{0,3}$	-	-
	1	-	$\frac{0,22}{0,54}$	$\frac{0,12}{0,44}$	-	$\frac{0,38}{0,87}$	$\frac{0,29}{0,77}$	-	$\frac{0,36}{0,82}$	$\frac{0,26}{0,72}$	-	$\frac{0,07}{0,23}$	-	-	$\frac{0,18}{0,47}$	$\frac{0,09}{0,37}$
	3	-	$\frac{0,22}{0,53}$	$\frac{0,12}{0,67}$	-	$\frac{0,38}{0,87}$	$\frac{0,29}{0,77}$	-	$\frac{0,36}{0,82}$	$\frac{0,26}{1,25}$	-	$\frac{0,07}{0,37}$	-	-	$\frac{0,19}{0,85}$	$\frac{0,09}{0,58}$
	5	-	$\frac{0,22}{1,41}$	$\frac{0,12}{0,91}$	-	$\frac{0,38}{2,41}$	$\frac{0,29}{1,91}$	-	$\frac{0,36}{2,28}$	$\frac{0,26}{1,78}$	-	$\frac{0,07}{0,50}$	-	-	$\frac{0,19}{1,23}$	$\frac{0,09}{0,73}$

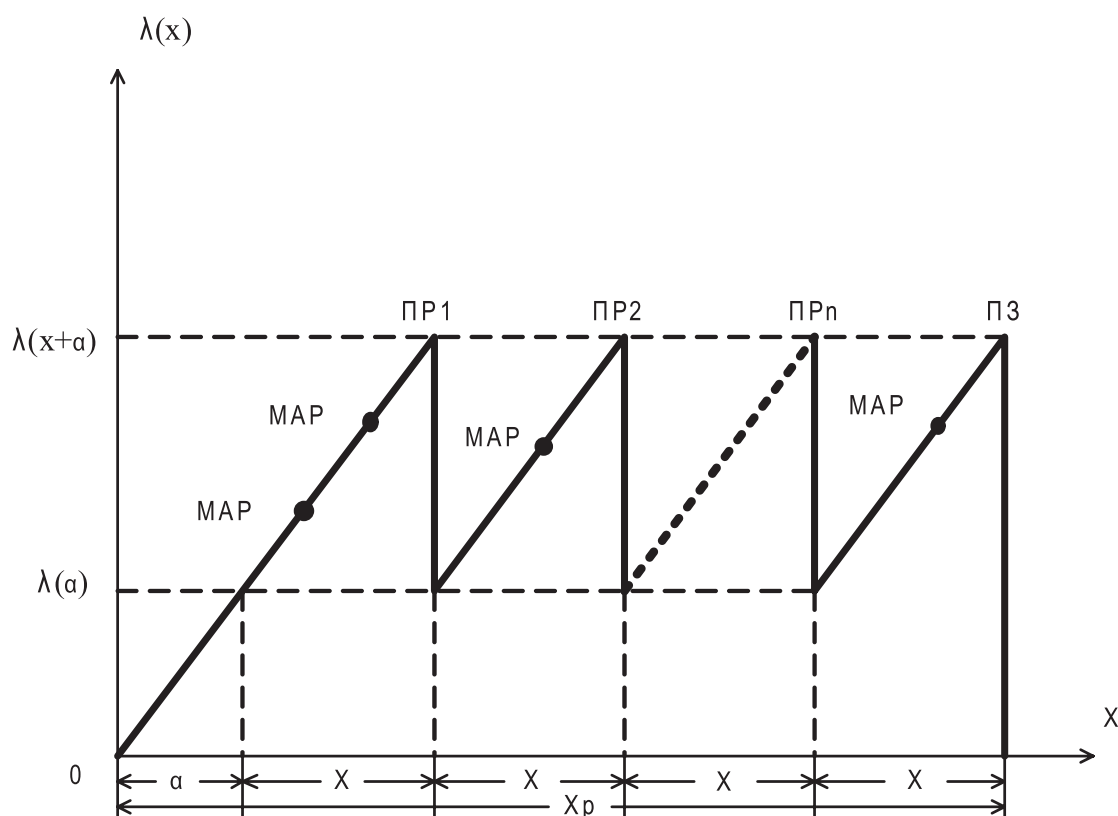


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов при проведении предупредительных замен и ремонтов

В качестве примера из выражения (12) найдем уравнение для определения значений α_g при распределении Вейбулла с параметром формы $b = 2$

$$\alpha_g = 0,56\lambda_g - x.$$

Из полученного уравнения видно следующее. Во-первых, с уменьшением допустимого значения ИО и периодичности ПР снижается допустимое значение глубины восстановления безотказности ТУ. Во-вторых, существует предельное значение периодичности, когда значение α_g становится равным нулю и необходимо вместо ремонта проводить замену технических устройств.

Заключение

При условии обеспечения допустимого значения интенсивности отказов технических устройств, предлагаемый метод позволяет:

- при заданном значении глубины восстановления безотказности определить периодичность ремонтов;

- при заданном значении периодичности ремонтов определить глубину восстановления безотказности;

- при заданных значениях глубины восстановления безотказности, количества и периодичности ремонтов определить срок замены технических устройств.

Литература

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Методическое руководство по управлению ресурсами и рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики на основе методологии УРРАН, утверждено 8 декабря 2012 г. ОАО «РЖД».
3. Володарский В.А. Об оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств / Надежность и контроль качества. 1989. – № 6. – С. 21-24.
4. Володарский В.А. Определение показателей надежности при неопределенности исходной информации / Электричество. 1987. – № 3. – С. 49-51.