

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Сугак Е.В.

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, г.Красноярск

Ключевые слова: техническое обслуживание, управление техническим состоянием, безопасность, технический риск.

Аннотация. Рассматривается определение вероятности состояния готовности при различных сочетаниях параметров системы технического обслуживания для установившегося и неуставившегося режимов эксплуатации. Полученные решения дают возможность решать задачи управления техническим состоянием, оптимизации надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов.

Оптимизация техногенного риска и определение оптимальных параметров системы технического обслуживания потенциально опасных технических объектов определяется видом и сложностью самого объекта, характером и важностью выполняемых функций, числом и видом его возможных состояний, тяжестью последствий отказов, а также стратегией эксплуатации и технического обслуживания [1].

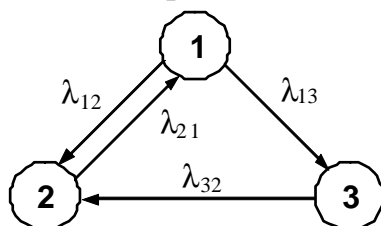
Для потенциально опасных промышленных объектов с периодическим техническим обслуживанием возможны три состояния и переходы четырех видов (рис.1) [2]:

- из работоспособного состояния (состояния готовности) 1 в состояние технического обслуживания 2 с периодичностью $t_{ТО}$ и, соответственно, интенсивностью переходов $\lambda_{12} = 1/t_{ТО}$;

- из состояния готовности 1 в состояние отказа 3 с интенсивностью переходов, равной интенсивности отказов $\lambda_{13} = \lambda$;

- из состояния технического обслуживания 2 в состояние готовности 1 с интенсивностью, которая определяется продолжительностью технического обслуживания $\lambda_{21} = 1/\tau_{ТО}$;

- из состояния отказа 3 в состояние технического обслуживания 2 (переход, обусловленный обнаружением скрытого отказа при техническом обслуживании) с интенсивностью переходов λ_{32} .



- 1 - работоспособное состояние (готовность к работе);
- 2 - техническое обслуживание;
- 3 - скрытый отказ (до проведения технического обслуживания)

Рис.1. Граф состояний объекта с периодическим техническим обслуживанием

Единственным работоспособным состоянием такого объекта является состояние готовности 1 и поэтому основным показателем его надежности можно

считать вероятность этого состояния P_1 . При анализе безопасности основным параметром является вероятность отказа (технический риск) $Q = P_3$.

Параметры t_{TO} , λ , τ_{TO} и, соответственно, интенсивности переходов λ_{12} , λ_{13} , λ_{21} могут быть получены по результатам испытаний и эксплуатации или задаются регламентом технического обслуживания. Для нахождения неизвестной интенсивности переходов λ_{32} можно воспользоваться свойствами марковских процессов с непрерывным временем [3]. В частности, так как переход 3-2 единственный, то его вероятность $p_{32} = 1$, и, очевидно, $t_3 = t_{TO} - t_{13}$, а $t_{13} = t_1$, тогда:

$$\lambda_{32} = p_{32}/t_3 = 1/t_3 = 1/(t_{TO} - t_{13}) = 1/(t_{TO} - t_1). \quad (1)$$

Кроме того $\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{13} = 1/t_{TO} + \lambda$ и для простейшего потока отказов

$$t_1 = \int_0^{\infty} [1 - F_1(t)] dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_1 t) dt = \int_0^{\infty} \exp\left[-\left(\lambda + \frac{1}{t_{TO}}\right)t\right] dt = \frac{1}{\lambda + \frac{1}{t_{TO}}}. \quad (2)$$

Тогда

$$t_3 = t_{TO} - t_1 = t_{TO} - \frac{1}{\frac{1}{t_{TO}} + \lambda}, \quad (3)$$

и в соответствии с формулой (1)

$$\lambda_{32} = \frac{1}{t_{TO} - \frac{1}{\frac{1}{t_{TO}} + \lambda}} = \frac{1 + \lambda t_{TO}}{\lambda t_{TO}^2}. \quad (4)$$

Система дифференциальных уравнений для ориентированного графа состояний на рис.1 имеет вид [2]

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) = -\left(\lambda + \frac{1}{t_{TO}}\right)P_1(t) + \frac{1}{\tau_{TO}}P_2(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{32}P_3(t) = \frac{1}{t_{TO}}P_1(t) - \frac{1}{\tau_{TO}}P_2(t) + \frac{1 + \lambda t_{TO}}{\lambda t_{TO}^2}P_3(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{32}P_3(t) = \lambda P_1(t) - \frac{1 + \lambda t_{TO}}{\lambda t_{TO}^2}P_3(t). \end{cases} \quad (5)$$

Так как система уравнений (5) линейно зависима, то для ее решения одно из уравнений необходимо заменить нормирующим условием $P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1$. Кроме того, необходимо задаться начальными условиями, например $P_1(0) = 1$, $P_2(0) = P_3(0) = 0$.

Решение системы уравнений (5) относительно вероятности состояния готовности P_1 может быть получено в виде [4]:

$$P_1(t) = \frac{\lambda_{13}^2 + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 - \lambda_{32}\lambda_{13} - \lambda_{32}\lambda_{12} - \lambda_{21}\lambda_{13} + \lambda_{21}\lambda_{12} -}{[-\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 -$$

$$\begin{aligned}
 & -\lambda_{13}(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} - \\
 & \quad - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} \times \\
 & -\lambda_{12}(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} \\
 & \quad \times (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} \\
 & \quad \times \exp\left\{\frac{1}{2}t\left[-\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}\right]\right\} + \\
 & \quad + \frac{\lambda_{13}^2 + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 + (\lambda_{13} + \lambda_{12})(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - }{[\lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - } \\
 & \quad - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} - } \\
 & \quad - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}] \times \\
 & \quad - (\lambda_{32}(\lambda_{13} + \lambda_{12}) + \lambda_{21}(\lambda_{13} - \lambda_{12})) \\
 & \quad \times (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2} \times \\
 & \quad \times \exp\left\{-\frac{1}{2}t\left[\lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}\right]\right\} - \\
 & \quad - \frac{4\lambda_{32}}{\left[-\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - } \right. \\
 & \quad \left. \lambda_{21} \right. \\
 & \quad \left. - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}\right]} \times \\
 & \quad \frac{1}{\left[\lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + (\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - } \right. \\
 & \quad \left. - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2)^{1/2}\right]}. \tag{6}
 \end{aligned}$$

Результаты расчетов показывают, что вероятность состояния готовности и, соответственно, технический риск определяются, в первую очередь, интенсивностью отказов объекта и периодичностью технического обслуживания (табл.1). Кроме того, результаты расчетов позволяют судить о продолжительности переходных процессов («периода релаксации»), в течение которой вероятность состояния готовности снижается до некоторой «финальной» вероятности, и, соответственно, о возможности использования для расчетов стационарной модели (рис.1).

Табл. 1.

Вероятность состояния готовности объекта ($\tau_{TO} = 10$ ч)

$t_{TO},$ лет	$\lambda,$ $ч^{-1}$	Срок эксплуатации $t,$ лет						Финальная вероятность
		0,1	0,5	1	2	5	10	
0,5	10^{-4}	0,9358	0,8826	0,8798	0,8797	0,8797	0,8797	0,8797
	10^{-5}	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958
	10^{-6}	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977
1	10^{-4}	0,9232	0,7728	0,7228	0,7093	0,7086	0,7086	0,7086
	10^{-5}	0,9938	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918
	10^{-6}	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
2	10^{-4}	0,9187	0,7020	0,5724	0,4914	0,4734	0,4724	0,4724
	10^{-5}	0,9920	0,9785	0,9747	0,9739	0,9739	0,9739	0,9739
	10^{-6}	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991

Для установившегося режима эксплуатации система дифференциальных уравнений (5) вырождается в систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1 + \lambda_{21}P_2 = -(t_{TO}^{-1} + \lambda)P_1 + \tau_{TO}^{-1}P_2 = 0, \\ \lambda_{12}P_1 - \lambda_{21}P_2 + \lambda_{32}P_3 = t_{TO}^{-1}P_1 - \tau_{TO}^{-1}P_2 + \left[t_{TO} - (t_{TO}^{-1} + \lambda)^{-1} \right]^{-1} P_3 = 0, \\ \lambda_{13}P_1 - \lambda_{32}P_3 = \lambda P_1 - \left[t_{TO} - (t_{TO}^{-1} + \lambda)^{-1} \right]^{-1} P_3 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

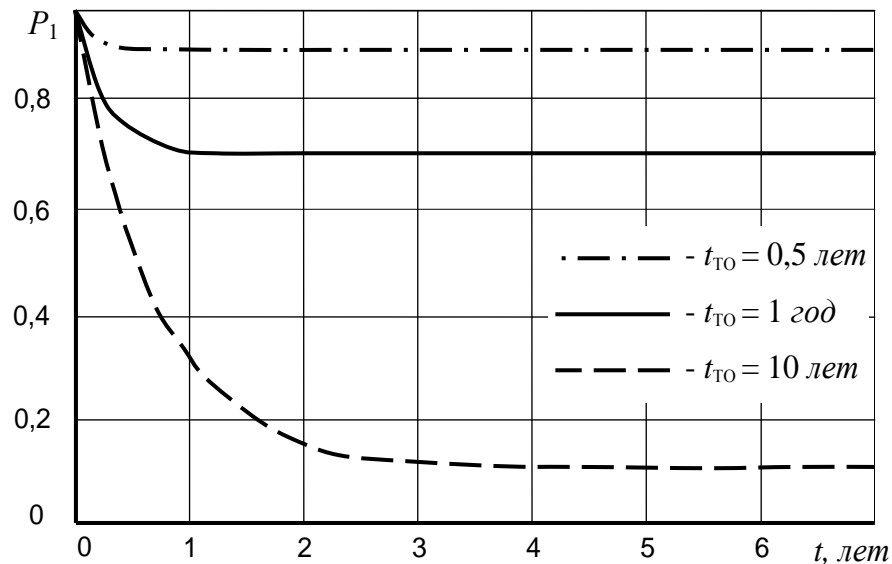


Рис. 1. Зависимость вероятности состояния готовности объекта от срока эксплуатации: $\tau_{TO} = 10$ ч, $\lambda = 10^{-4}$ ч⁻¹

При дополнении системы (7) нормирующим условием $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ решение для финальных вероятностей состояний имеет вид:

$$P_1 = \frac{t_{TO}(1 + t_{TO}\lambda)}{\lambda^2 t_{TO}^2 \tau_{TO} + \tau_{TO} + 2\lambda t_{TO} \tau_{TO} + \lambda^2 t_{TO}^3 + t_{TO} + \lambda t_{TO}^2}, \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{\tau_{TO} (2\lambda t_{TO} + \lambda^2 t_{TO}^2 + 1)}{\lambda^2 t_{TO}^2 \tau_{TO} + \tau_{TO} + 2\lambda t_{TO} \tau_{TO} + \lambda^2 t_{TO}^3 + t_{TO} + \lambda t_{TO}^2}, \quad (9)$$

$$P_3 = \frac{\lambda^2 t_{TO}^3}{\lambda^2 t_{TO}^2 \tau_{TO} + \tau_{TO} + 2\lambda t_{TO} \tau_{TO} + \lambda^2 t_{TO}^3 + t_{TO} + \lambda t_{TO}^2}. \quad (10)$$

Некоторые результаты расчетов по формулам (8)-(10) приведены на рис.2 и 3 в виде графиков зависимости вероятности состояния готовности P_1 и вероятности неработоспособного состояния P_2+P_3 объекта от периодичности технического обслуживания t_{TO} при различных значениях интенсивности отказов λ и длительности технического обслуживания τ_{TO} .

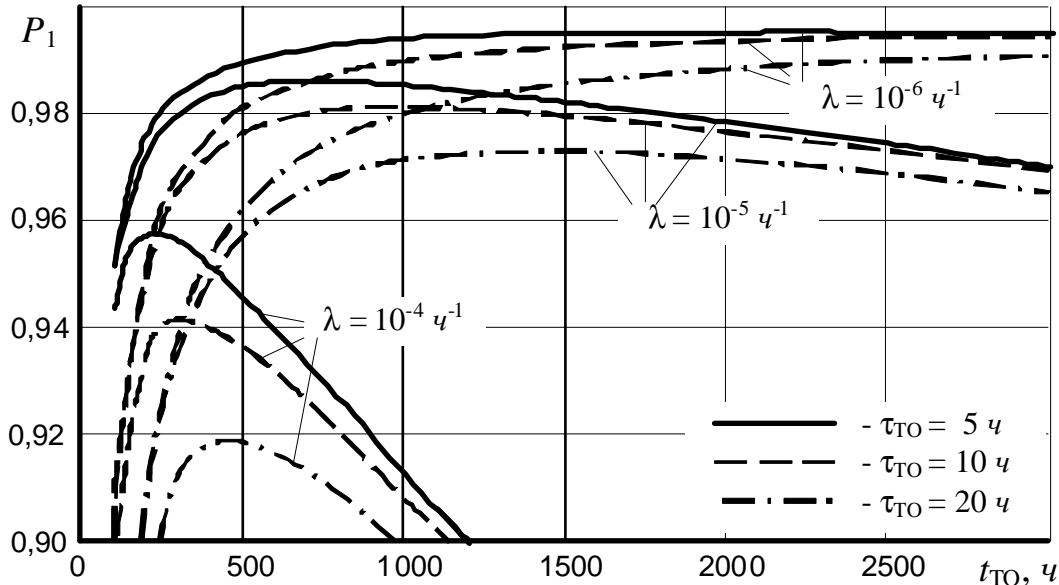


Рис. 2. Зависимость вероятности состояния готовности от периодичности технического обслуживания

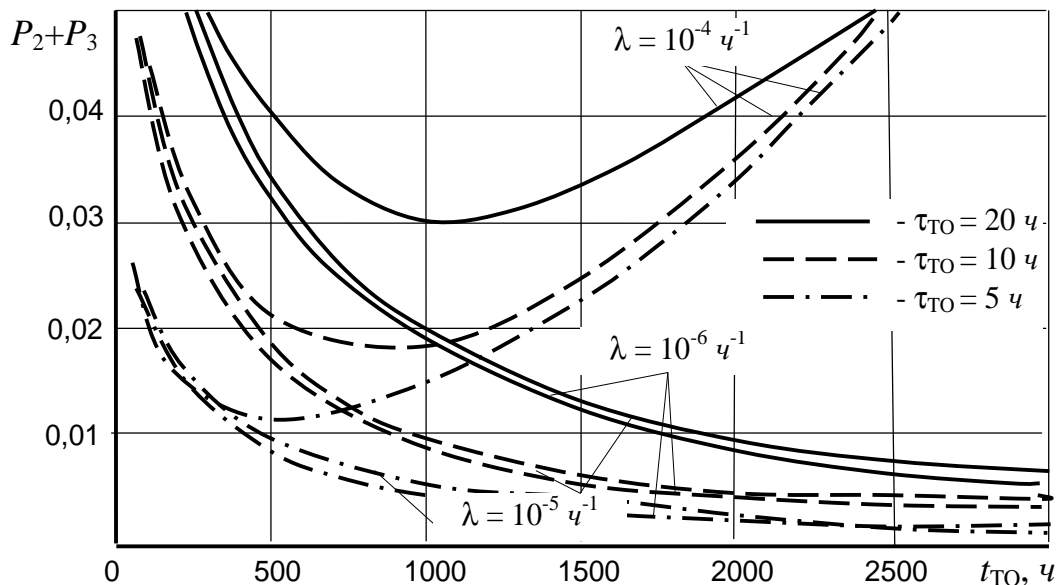


Рис. 3. Зависимость вероятности неработоспособного состояния объекта от периодичности технического обслуживания

Обращает на себя внимание наличие экстремумов (максимума или минимума), т.е. при известных значениях λ и τ_{TO} существует оптимальная

периодичность технического обслуживания и, соответственно, предельное максимальное значение вероятности состояния готовности объекта и предельное минимальное значение технического риска.

Полученные аналитические решения для неустановившегося и установившегося режимов эксплуатации дают возможность решать задачи управления техническим состоянием, оптимизации надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов [1, 4-6].

Список литературы

1. Окладникова Е.Н., Сугак Е.В., Игнатьев Д.А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов // Вестник СибГАУ. 2007. № 4. С.43-47.
2. Сугак Е.В. и др. Надежность технических систем. – Красноярск: МГП «Раско», 2001. – 608с.
3. Сугак Е.В., Окладникова Е.Н. Прикладная теория случайных процессов. Основные положения и инженерные приложения. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 168 с.
4. Окладникова Е.Н. Оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных объектов. Дисс...канд. техн. наук. – Красноярск: СибГАУ, 2008. – 135 с.
5. Окладникова Е.Н., Сугак Е.В. Управление техническим состоянием потенциально опасных объектов // Системы управления и информационные технологии. 2009. Т.35, № 1-1. С.192-196.
6. Механика современных специальных систем. Монография в 3-х томах. Под общ. ред. Н.В. Василенко и Н.И. Галибея. Т.3. – Красноярск: ООО «Печатные технологии», 2004. – 558 с.

Сведения об авторе:

Сугак Евгений Викторович – д.т.н., профессор, СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, г.Красноярск.

OPTIMIZATION OF THE MAINTENANCE SYSTEM OF POTENTIALLY HAZARDOUS MACHINERY

Sugak E.V.

Keywords: maintenance, maintenance management, security, technical risk.

Abstract. Discusses how to define a probability the ready state when different combinations of the parameters of the maintenance system for steady and neustanovivshegosja modes of operation. The obtained solutions are able to solve the technical condition management tasks, optimizing the reliability and safety of potentially hazardous industrial sites.