

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ 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.** Разработан метод и представлены результаты расчетов оптимальной периодичности технического обслуживания с использованием экономико-математических критериев, позволяющий обеспечивать оптимальное управление безопасностью потенциально опасных промышленных объектов и минимизировать техногенный риск.

Роль экономических показателей при анализе и обеспечении надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов делает весьма актуальным вопросы их оценки и оптимизации, как на этапах разработки и проектирования, так и при эксплуатации и техническом обслуживании [1]. Ущерб от аварийных отказов является важнейшим экономическим показателем и служит связующим и дополняющим звеном, позволяющим учесть сопряженные затраты, зависящие от уровня надежности и безопасности, при расчете эффективности капитальных вложений и внедрения новой техники, принятии управленческих решений.

В научно-технической литературе и некоторых нормативных документах по экологической и промышленной безопасности все большее распространение получает подход к определению риска неблагоприятного события, который учитывает не только вероятность этого события, но и все его возможные последствия [1-9]. При этом вероятность события выступает одним из компонентов риска, а мера последствий (ущерб) - другим. Такое «двумерное» определение техногенного риска используется при его количественном оценивании - риск может быть определен как произведение вероятности рассматриваемого события на величину ожидаемых негативных последствий (ущерба) [7-10].

Тогда задача управления техногенным риском и обеспечения безопасности объекта при проектировании и эксплуатации может быть формализована как минимизация функции  $S$ , представляющей собой сумму рисков  $R_i$  всех возможных событий в жизни технического объекта [10-12]:

$$S = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n p_i U_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – вероятность  $i$ -го события;  $U_i$  – убытки (потери) при реализации  $i$ -го события.

Функция (1) может использоваться как для оценки безопасности, так и при выборе оптимальных проектных и управленческих решений и представляет собой простейший вариант модели «ожидаемой полезности» в теории принятия

решений [12,13]. При этом должны учитываться все возможные состояния и события – полный и частичные отказы, перевод объекта в состояния технического обслуживания, контроля, диагностики, профилактических работ и т.д.

В качестве последствий аварийных отказов должны учитываться прямые и косвенные социальный, экономический и экологический ущербы, в качестве последствий остальных состояний – затраты на проведение соответствующих работ [10-12]. При этом все виды ущерба и затрат должны выражаться в одних единицах измерения (чаще всего – финансовых).

В простейшем случае в качестве критерия для расчета периодичности технического обслуживания (или проведения диагностики) может приниматься минимум средних удельных (на единицу времени) суммарных потерь от отказов и планового технического обслуживания в течение периода между восстановлениями [10, 11]:

$$S(\tau) = Up(t < \tau) + Cp(t \geq \tau), \quad (2)$$

где  $U$  – ущерб от отказа (средние затраты, связанные с отказом, ликвидацией его последствий и последующим восстановлением объекта);  $C$  – затраты и потери, связанные с проведением технического обслуживания;  $t$  – время работы до отказа (наработка на отказ);  $\tau$  – период между техническими обслуживаниями.

Если известна функция вероятности безотказной работы  $P(t)$  или вероятности отказа  $Q(t) = 1 - P(t)$ , то формулу (2) можно записать в виде:

$$S(\tau) = UQ(\tau) + C[1 - Q(\tau)] = U[1 - P(\tau)] + CP(\tau). \quad (3)$$

Очевидно время работы между восстановлениями  $t_p = \min\{t, \tau\}$ . Следовательно, математическое ожидание времени работы

$$M(t_p) = \int_0^{\tau} t f(t) dt + \tau P(\tau) = \int_0^{\tau} P(t) dt. \quad (4)$$

Тогда средние удельные затраты

$$s(\tau) = \frac{S(\tau)}{M(t_p)} = \frac{U[1 - P(\tau)] + CP(\tau)}{\int_0^{\tau} P(t) dt}. \quad (5)$$

Для определения значения времени или наработки  $\tau$ , при которых средние удельные затраты  $s(\tau)$  будут минимальными, необходимо производную функции (5) приравнять нулю. После этого можно получить

$$P(\tau) + \lambda(\tau) \int_0^{\tau} P(t) dt = \frac{U}{U - C}. \quad (6)$$

При известных функциях  $P(t)$  и  $\lambda(t)$  уравнение (6) позволяет найти оптимальную продолжительность работы технического объекта между плановыми техническими обслуживаниями.

Если у объекта возможны только неявные отказы, то при прочих равных условиях, в суммарных затратах необходимо учесть дополнительные потери от скрытого отказа  $u$ :

$$\begin{aligned}
 S(\tau) &= Up(t < \tau) + Cp(t \geq \tau) + u \int_0^{\tau} t f(\tau - t) dt = U[1 - P(\tau)] + CP(\tau) + u \int_0^{\tau} [1 - P(t)] dt = \\
 &= U + (C - U)P(t) + u \left[ \tau - \int_0^{\tau} P(t) dt \right].
 \end{aligned} \quad (7)$$

Средние удельные затраты за время  $\tau$

$$s(\tau) = \frac{1}{\tau} \left\{ U + (C - U)P(t) + u \left[ \tau - \int_0^{\tau} P(t) dt \right] \right\}. \quad (8)$$

Приравняв нулю производную выражения (8) по  $\tau$ , получим уравнение

$$P(\tau) - \tau \frac{dP(t)}{dt} - \frac{u}{U - C} \left[ \tau - \int_0^{\tau} P(t) dt \right] = \frac{U}{U - C}, \quad (9)$$

решением которого можно определить оптимальную периодичность технического обслуживания.

Для установившегося режима эксплуатации и «финальных вероятностей» состояний оптимальная периодичность технического обслуживания, обеспечивающая минимальное значение величины техногенного риска (9), определяется, в первую очередь, отношением ущерба от аварийного отказа  $U$  и затрат на техническое обслуживание  $C$  (рис.1) [1,10,11].

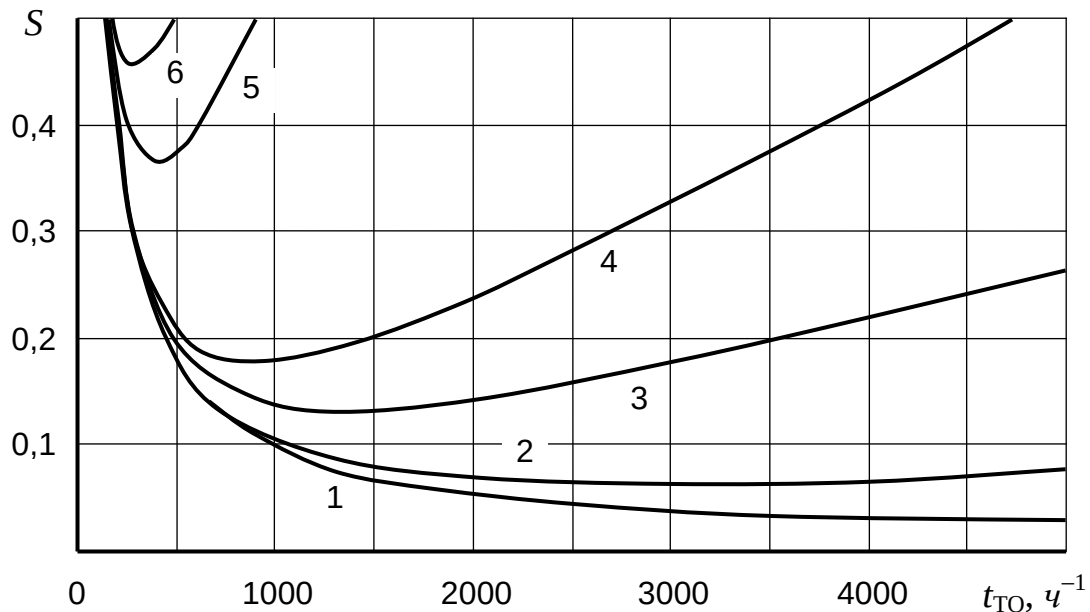


Рис.1. Зависимость техногенного риска от периодичности технического обслуживания и отношения затрат  $U/C$  ( $\lambda = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\tau_{TO} = 100 \text{ ч}$ ):  
 1 –  $U/C = 10$ ; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1000; 5 – 5000; 6 – 10000

В табл.1 представлены результаты расчетов оптимальной периодичности технического обслуживания  $T_{opt}$ , обеспечивающие минимальное значение величины техногенного риска  $S_{min}$  при заданных параметрах интенсивности отказов  $\lambda$ , продолжительности технического обслуживания  $\tau$  и отношения убытков (потерь) при аварийном отказе к затратам на техническое обслуживание  $U/C$ .

Табл. 1. Оптимальная периодичность технического обслуживания

| $\tau, ч$ | $U/C$ | Периодичность технического обслуживания $T_{opt}, ч$ |                            |                            |
|-----------|-------|------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|           |       | $\lambda = 10^{-8} ч^{-1}$                           | $\lambda = 10^{-7} ч^{-1}$ | $\lambda = 10^{-6} ч^{-1}$ |
| 10        | 10    | 9992                                                 | 3154                       | 992                        |
|           | 100   | 3152                                                 | 990                        | 307                        |
|           | 1000  | 990                                                  | 306                        | 91                         |
|           | 10000 | 306                                                  | 91                         | 23                         |
| 20        | 10    | 14126                                                | 4456                       | 1398                       |
|           | 100   | 4453                                                 | 1395                       | 428                        |
|           | 1000  | 1394                                                 | 428                        | 123                        |
|           | 10000 | 428                                                  | 123                        | 29                         |
| 50        | 10    | 22321                                                | 7031                       | 2196                       |
|           | 100   | 7022                                                 | 2188                       | 660                        |
|           | 1000  | 2187                                                 | 659                        | 179                        |
|           | 10000 | 659                                                  | 179                        | 37                         |
| 100       | 10    | 31543                                                | 9920                       | 3083                       |
|           | 100   | 9902                                                 | 3066                       | 907                        |
|           | 1000  | 3064                                                 | 905                        | 232                        |
|           | 10000 | 905                                                  | 232                        | 41                         |

Таким образом, разработанный метод позволяет определить оптимальную периодичность технического обслуживания потенциально опасного промышленного объекта с учетом экономико-математических критериев, позволяющий обеспечивать оптимальное управление безопасностью и минимизировать техногенный риск.

#### 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. Алымов В.Т., Крапчатов В.П., Тарасова Н.П. Анализ техногенного риска. – М.: Круглый год, 2000. – 160 с.
3. Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С. Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 5. С.33-41.
4. Сугак Е.В., Окладникова Е.Н., Кузнецов Е.В. Вычислительные и информационные технологии анализа и оценки социально-экологических рисков // Экология и промышленность России. 2008. № 8. С.24-29.
5. Сугак Е.В., Окладникова Е.Н., Ермолаева Л.В. Информационные технологии управления социально-экологическим риском // Вестник СибГАУ. 2008. № 4(21). С.87-91.
6. Сугак Е.В., Кузнецов Е.В., Назаров А.Г. Информационные технологии оценки экологической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т.18, № 12. С.39-45.
7. Бельская Е.Н., Бразговка О.В., Сугак Е.В. Методика расчета экологических рисков // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С.84-91.
8. Сугак Е.В. Современные методы оценки экологических рисков // European Social Science Journal. 2014. № 5-2 (44), т.2. С.427-433.
9. Сугак Е.В., Бразговка О.В., Бельская Е.Н. Техногенные социально-экологические риски населения промышленного региона // Актуальные направления научных исследований начала XXI века. Сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону: Изд-во Международного исследовательского центра «Научное сотрудничество», 2015. – С.13-24.

10. 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.
11. Сугак Е.В. и др. Надежность технических систем. – Красноярск: МГП «Раско», 2001. – 608с.
12. Сугак Е.В., Окладникова Е.Н. Прикладная теория случайных процессов. Основные положения и инженерные приложения. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 168 с.
13. Шумейкер П. Модель ожидаемой полезности: разновидности, подходы, результаты и пределы возможностей // THESIS. 1994. № 5. С.29-80.

Сведения об авторе:

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

**FEASIBILITY STUDY OF THE MAINTENANCE SYSTEM OF POTENTIALLY  
HAZARDOUS MACHINERY**  
*Sugak E.V.*

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

**Abstract.** The method and the results of calculations the optimal frequency of maintenance using economic-mathematical criteria to ensure an optimal management of potentially hazardous industrial facilities and minimize the risk of man-made.