

ВОЛОДАРСКИЙ В. А., к.т.н., с.н.с., профессор,  
ОРЛЕНКО А. И., к.т.н., доцент, директор (Красноярский институт железнодорожного транспорта, Россия)

## Об оптимизации технического содержания линий и сетей

*В результате анализа состояния вопроса предложена стратегия и математическая модель оптимизации технического содержания протяженных объектов, отличающаяся учетом глубины восстановления ресурса при ремонте линий и сетей. Рассмотрены также частные случаи общей модели при проведении только предупредительных замен или только предупредительных ремонтов.*

*Для учета глубины восстановления ресурса при проведении оптимального ремонта использован параметр, означающий «возраст» протяженного объекта, определяемый как относительная разница между его доремонтным и межремонтным ресурсом.*

*Применимость модели оптимизации продемонстрирована на примере технического содержания контактной сети.*

*Предлагаемая математическая модель оптимизации технического содержания позволяет при заданной глубине восстановления ресурса определять оптимальную периодичность предупредительных капитальных ремонтов и замены линий и сетей, а также оптимальное количество капитальных ремонтов за период срока службы протяженных объектов.*

**Ключевые слова:** ресурс, глубина восстановления, ремонт, замена, математическая модель, оптимизация.

### Состояние вопроса

Линии и сети различного назначения относятся к протяженным объектам, которые с позиции надежности представляют собой множество разнообразных однотипных последовательно соединенных элементов. Например, на железнодорожном транспорте к таким объектам относятся контактная сеть электрифицированных участков, воздушные и кабельные линии электропередач, линии связи, сети передачи данных в автоматизированных системах управления и в устройствах автоматики и телемеханики. Характерной особенностью при отказах протяженных объектов – определение, локализация и восстановление ограниченных поврежденных участков линий и сетей. Под техническим содержанием согласно [1] будем понимать совокупность мероприятий, направленных на поддержание и восстановление работоспособного состояния объектов и на восстановление их ресурса.

Оптимизацию технического содержания рассмотрим на примере контактной сети (КС). В процессе эксплуатации КС проводится техническое обслуживание (ТО), текущие (ТР) и капитальные (КР) ремонты, а также реконструкция, эквивалентная предупредительной замене [2, 3]. При выполнении ТО в виде осмотров, обследований, испытаний и измерений устанавливается только техническое состояние КС [3]. При этом согласно [4] при

выполнении ТР происходит только восстановление работоспособности, а при КР – кроме того и восстановление до определенного уровня ресурса объектов. Полное восстановление ресурса объектов происходит только при их замене.

В настоящее время в теории надежности [5, 6] разработаны методические вопросы оптимизации предупредительных замен (ПЗ) с аварийными заменами (АЗ) или с минимальным аварийным ремонтом (МАР) при отказах. В перечисленных публикациях учитываются только два крайних случая глубины восстановления ресурса: никакого обновления, когда выполняется МАР, и полное обновление, когда выполняется АЗ или ПЗ. Практический же интерес представляют промежуточные значения глубины восстановления ресурса устройств между этими крайними случаями.

**Цель статьи** – предложить и исследовать математическую модель оптимизации технического содержания протяженных объектов, отличающуюся учетом глубины восстановления ресурса.

### Стратегия и математическая модель оптимизации технического содержания

Для учета глубины восстановления ресурса предлагается использовать согласно [7] параметр  $a = T_{др} - T_{мр}$ , означающий «возраст» объекта после проведения предупредительного капитального

ремонта. Здесь  $T_{др}$  и  $T_{мр}$  - соответственно доремонтный и межремонтный ресурс [7]. В дальнейшем при разработке математических моделей оптимизации технического содержания для оценки глубины восстановления ресурса целесообразно использовать безразмерный параметр  $\alpha = a/T_{др}$ . Если  $\alpha=0$  то это означает, что проведена замена. Если проведен капитальный ремонт, например, через время  $T$  то «возраст» уменьшается от  $T$  до  $\alpha \cdot T$ .

Контактная сеть с позиций обеспечения надежности относится к объектам большой протяженности с множеством последовательно соединенных различных элементов. В процессе устранения отказов восстанавливается только отдельный поврежденный участок КС, что практически не изменяет текущих показателей надежности контактной сети в целом. В связи с этим

рассмотрим стратегию технического содержания, при которой отказы работоспособности устраняются минимальным аварийным ремонтом, а после проведения  $n$  предупредительных капитальных ремонтов осуществляется замена контактной сети.

Характер изменения интенсивности отказов (ИО) от времени эксплуатации при этой стратегии представлен на рис. 1. После проведения минимальных аварийных ремонтов интенсивность отказов не изменяется. После проведения предупредительных капитальных ремонтов (ПР) с периодичностью  $x$  и глубиной восстановления ресурса  $a$  ИО снижается до значения  $\lambda(a)$ , а после проведения ПЗ с периодичностью  $x_p$  - до нуля. ИО в момент проведения ПР и ПЗ составляет  $\lambda(x+\alpha)$ . Здесь значения  $x$  и  $x_p$  измеряются в единицах ресурса.

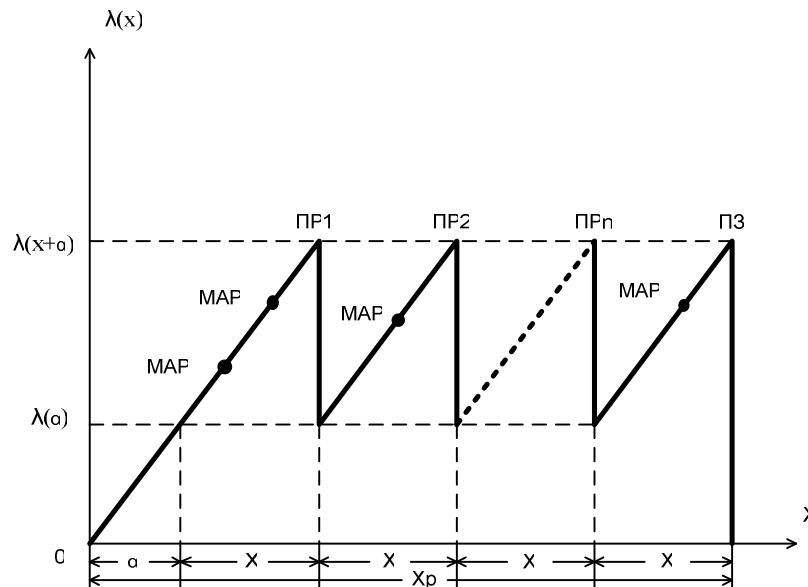


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов при проведении предупредительных КР и замены с минимальным аварийным ремонтом

Математическая модель оптимизации технического содержания протяженных объектов при этой стратегии определяется из выражения

$$y = (1 + n\gamma) + \varepsilon \int_0^{x_p} \lambda(x) dx / x_p, \quad (1)$$

где  $y$  - относительные удельные эксплуатационные затраты;

$\gamma$  - параметр стоимости капитального ремонта;

$\varepsilon$  - параметр стоимости минимального аварийного ремонта;

$\lambda$  - интенсивность отказов;

Количество отказов на интервале  $0 - x_p$  определится как

$$\int_0^{x_p} \lambda(x) dx = \int_0^{\alpha} \lambda(x) dx + (n+1) \int_{\alpha}^{x+\alpha} \lambda(x) dx = n \ln P(\alpha) - (n+1) \ln P(x+\alpha). \quad (2)$$

Здесь  $P$  – вероятность безотказной работы.

Подставив значения  $\int_0^{x_p} \lambda(x) dx$  из (2) в (1), и

учитывая, что  $x_p = \alpha + (n+1)x$ , получим математическую модель вида

$$y = \frac{1 + n\gamma + \varepsilon(n \ln P(\alpha) - (n+1) \ln P(x + \alpha))}{\alpha + (n+1)x}. \quad (3)$$

Рассмотрим два частных случая модели (3):

при  $n = 0$  и  $\alpha = 0$  (проводятся только замены, полностью восстанавливающие первоначальный ресурс) получим математическую модель вида

$$y = (1 - \varepsilon \ln P(x)) / x,$$

которая известна как модель предупредительных замен с минимальным аварийным ремонтом при отказе [5];

при  $n \rightarrow \infty$  (проводятся только капитальные ремонты) после раскрытия неопределенности в выражении (3), получим математическую модель вида

$$y = (\gamma - \varepsilon(\ln P(x + \alpha) - \ln P(\alpha))) / x,$$

которая соответствует стратегии предупредительных капитальных ремонтов с минимальным аварийным ремонтом при отказе [7].

С использованием выражения (3) при заданных значениях  $n$  и  $\alpha$  оптимальная периодичность предупредительного капитального ремонта  $x_0$  и минимум удельных эксплуатационных затрат  $y_0$

определим из условия  $\partial y / \partial x = 0$  как

$$(\alpha + (n+1)x_0)\lambda(x_0 + \alpha) + (n+1) \ln P(x_0 + \alpha) - n \ln P(\alpha) = (1 + n\gamma) / \varepsilon;$$

$$y_0 = \varepsilon \lambda(x_0 + \alpha).$$

Периодичность КР может быть определена из выражения

$$x = (x_p - \alpha) / (n+1). \quad (4)$$

Тогда

$$x + \alpha = (x_p + n\alpha) / (n+1). \quad (5)$$

Подставив полученные значения  $x$  и  $x + \alpha$  из (4) и (5) в выражение (3), преобразуем его к виду

$$y = \left( 1 + n\gamma + \varepsilon \left( n \ln P(\alpha) - (n+1) \ln P \left( \frac{x_p + n\alpha}{n+1} \right) \right) \right) / x_p \quad (6)$$

С использованием выражения (6) при заданных значениях  $n$  и  $\alpha$  оптимальную периодичность предупредительных замен  $x_{p0}$  и минимум удельных эксплуатационных затрат  $y_0$  найдем из условия

$$\partial y / \partial x_p = 0 \text{ как}$$

$$x_{p0} \lambda \left( \frac{x_{p0} + n\alpha}{n+1} \right) + (n+1) \ln P \left( \frac{x_{p0} + n\alpha}{n+1} \right) - n \ln P(\alpha) = (1 + n\gamma) / \varepsilon;$$

$$y_0 = \varepsilon \lambda \left( \frac{x_{p0} + n\alpha}{n+1} \right).$$

С использованием выражения (6) при заданных значениях  $x_p$  и  $\alpha$  оптимальное количество капитальных ремонтов  $n_0$  определим из условия

$$\partial y / \partial n = 0 \text{ как}$$

$$\frac{x_p - \alpha}{n_0 + 1} \lambda \left( \frac{x_p + n_0\alpha}{n_0 + 1} \right) + \ln P \left( \frac{x_p + n_0\alpha}{n_0 + 1} \right) - \ln P(\alpha) = \gamma / \varepsilon.$$

### Заключение

Для учета глубины восстановления ресурса после проведения капитального ремонта целесообразно использовать параметр, определяемый как разница между доремонтным и межремонтным ресурсом, отнесенная к доремонтному ресурсу протяженного объекта.

Предлагаемая математическая модель оптимизации технического содержания позволяет при заданной глубине восстановления ресурса определять оптимальную периодичность предупредительных капитальных ремонтов и замены линий и сетей, а также оптимальное количество капитальных ремонтов за период срока службы протяженных объектов.

### Литература

- ГОСТ 32192 – 2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения.
- СТО РЖД 1.12.001 – 2007. Устройства электрификации и электроснабжения. Техническое обслуживание и ремонт. Общие требования.

3. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ – 868). – М.: Трансиздат, 2002. -184 с.
4. ГОСТ 18322 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1961. – 488 с.
6. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
7. Володарский В.А., Орленко А.И. Восстановление ресурса и стратегии технического содержания устройств // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2015.- № 3. - С. 73-77.

**Volodarsky V.A., Orlenko A.I. On the optimization of line and network maintenance.** As a result of the issue analysis the strategy and mathematical model of optimization of extended object maintenance characterized by the extent of resource recovery depth at the repair of lines and networks have been proposed. Special cases of the general model when performing preventive replacements or preventive repairs only have been also considered.

It is advisable to use the parameter that indicates the “age” of an extended object, which is defined as the relative difference between its pre-repair resource and its inter-repair resource to account the depth of the resource recovery during overhaul.

The applicability of the optimization model has been demonstrated through the example of maintenance of the contact network.

The proposed mathematical model of maintenance optimization would allow defining the optimal frequency of preventive capital repairs and replacement of lines and networks, as well as the optimal number of overhauls during the service life of extended objects at the given depth of resource recovery.

**Key words:** resource, depth of recovery, repair, replacement, mathematical model, optimization.

Рецензент д.т.н., профессор, зав. кафедрой электронной техники и телекоммуникаций М.Н. Петров (СибГАУ)

*Поступила 11.02.2016 р.*

*Volodarsky Vladislav A., PhD, senior researcher, associate professor, «Krasnoyarsk Institute of Railway Transport», Krasnoyarsk, Russia*

*Orlenko Aleksey I., PhD, associate professor, «Krasnoyarsk Institute of Railway Transport», Krasnoyarsk, Russia*