

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

## Оптимизация технического содержания аппаратуры автоматики и телемеханики

*Изложен метод для определения периодичности предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат. Рассмотрены три возможные стратегии и соответствующие им математические модели оптимизации технического содержания аппаратуры по этому критерию.*

*Представлены кривые зависимостей для определения оптимальных значений периодичности замен от соотношения коэффициентов стоимости при разных значениях глубины восстановления надежности аппаратуры. Для выбора рациональной стратегии представлена граничная кривая зависимости соотношения стоимости отремонтированной аппаратуры к стоимости новой аппаратуры от глубины восстановления надежности.*

*Из полученных результатов установлено, что задача определения периодичности предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат при использовании для описания ее отказов распределения косинуса решается в аналитическом виде.*

**Ключевые слова:** стратегия, замена, ремонт, периодичность, удельные затраты, оптимизация.

### Состояние вопроса

Согласно инструкции [1], техническое содержание аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) заключается в периодических заменах с последующим ремонтом и проверкой ее в РТУ дистанций. В частном случае замена может проводиться не отремонтированной, а новой аппаратурой ЖАТ.

Для выбора рациональной стратегии предупредительных замен необходимо исходить из двух критериев:

минимума удельных эксплуатационных затрат  $C$ ;

допустимого значения интенсивности отказов  $\lambda$ .

Известно, что при ремонте аппаратуры ЖАТ возвращается лишь часть исходных надежностных свойств. В соответствии с [2] глубину восстановления надежности при проведении ремонтов аппаратуры ЖАТ будем оценивать как разницу между ее доремонтным и межремонтным ресурсом. Если у нового прибора нулевой «возраст», то после ремонта «возраст» прибора как бы возвращается в точку  $a$ . «Время жизни» прибора от 0 до  $a$  назовем глубиной восстановления надежности.

**Цель статьи** – исследовать математические модели технического содержания аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат для оптимизации периодичности предупредительных замен и выбора рациональной стратегии.

### Стратегии и математические модели

Рассмотрим три возможные стратегии технического содержания аппаратуры ЖАТ по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат.

**Нулевая стратегия**, при которой предупредительные замены не проводятся, а при отказах через среднюю наработку  $T$  проводятся аварийные замены новой аппаратурой стоимостью  $S$  с учетом ущерба от простоя поездов  $A$ . Тогда удельные эксплуатационные затраты определяются как  $C = A/T$ . Эта стратегия применяется в случаях, когда интенсивность отказов аппаратуры со временем не возрастает или когда стоимость предупредительной замены  $B$  и аварийной замены  $A$  равны между собой.

Нулевая стратегия является предельным случаем рассматриваемых ниже стратегий при периодичности предупредительных замен  $\tau \rightarrow \infty$ . Поэтому она принимается за базовую стратегию, а все остальные стратегии приводятся к ней и получают модели предупредительных замен в безразмерном виде, что удобно при их сравнении и исследовании.

**Стратегія 1** заключається в наступному. Якщо відмова апаратури не було, то через час  $\tau$  проводиться предупредительная замена ее новой апаратурой стоимостью  $B$ . Якщо стався відмова апаратури, то проводиться аварійна замена новою апаратурой стоимостью  $A$ , а очередная предупредительная замена переносится. Математическая модель как функция удельных эксплуатационных затрат от периодичности предупредительных замен при этой стратегии определяется согласно [2] из выражения

$$C(\tau)_1 = \frac{(A - (A - B)P(\tau))}{\int_0^\tau P(t)dt} \quad (1)$$

При значении  $\tau \rightarrow \infty$  получаем нулевую стратегию.

При  $A=B$  удельные эксплуатационные затраты будут равны  $C(\tau)_1 = A / \int_0^\tau P(t)dt$ , минимальное значение которых достигается только при значении  $\tau \rightarrow \infty$ , когда  $C = A/T$ .

**Стратегія 2** отличается от стратегии 1 тем, что вместо замены новой апаратурой проводиться аварійна замена стоимостью  $A_1$  или предупредительная замена стоимостью  $B_1$  апаратурой, отремонтированной в РТУ до возраста  $a$ . Математическая модель при этой стратегии определяется из выражения [2]

$$C(\tau)_2 = (A_1 - (A_1 - B_1)P(\tau + a)) / \int_0^\tau P(t + a)dt \quad (2)$$

Как частный случай при  $a = 0$ , когда  $A_1 = A$  и  $B_1 = B$ , получаем математическую модель при стратегии 1.

Очевидно, что применение стратегии 2 будет целесообразно, только когда стоимость отремонтированной в РТУ апаратуры будет ниже стоимости новой апаратуры.

Приведем выражения (1) и (2) к безразмерному виду, разделив их

на значение удельных эксплуатационных затрат при нулевой стратегии  $C$ . Тогда получим математические модели в безразмерном виде

$$y_1 = C(\tau)_1 / C = (1 - (1 - \gamma) P(x)) / ; \quad (1a)$$

$$y_2 = C(\tau)_2 / C = ((\beta P(a) - (\beta - \gamma_1) P(x + a)) / , \quad (2a)$$

где  $y_1$  и  $y_2$  – удельные эксплуатационные затраты при стратегиях 1 и 2 в безразмерном виде;

$x = \tau/T$  – периодичность предупредительных замен в единицах наработки на отказ;

$u = t/T$  – время эксплуатации в единицах наработки на отказ;

$a = a/T$  – глубина восстановления в единицах наработки на отказ;

$\gamma = B/A$  – коэффициент стоимости предупредительных замен новой апаратурой;

$\beta = A_1/A$  – коэффициент стоимости аварійных замен отремонтированной апаратуры;

$\gamma_1 = B_1/A$  – коэффициент стоимости предупредительных замен отремонтированной апаратуры.

### Определение исходных данных

При решении задач оптимизации периодичности предупредительных замен необходимо знание как стоимостных показателей, так и законов распределения наработки апаратуры на отказ. Стоимость новой и отремонтированной в РТУ апаратуры однозначно определяется нормативными документами. Трудности возникают при определении стоимости аварійных замен, в которые входит ущерб от сбоя движения и задержек поездов и которые носят вероятностный характер. При этом может быть использована методика расчета ущерба, изложенная в [3]. В случае неполноты исходных данных для оценки коэффициентов стоимости  $\gamma$ ,  $\gamma_1$  и  $\beta$  может быть применен метод экспертных оценок.

Особые трудности возникают с определением законов распределения наработки апаратуры на отказ. Как отмечается в [3], проведение для этой цели специальных испытаний требует больших затрат времени и средств, а иногда и просто невозможно. Поэтому показатели надежности апаратуры определяются путем сбора и обработки информации об отказах в условиях эксплуатации. Поскольку апаратура является восстанавливаемым изделием, когда после каждого отказа производится ее замена, то по эксплуатационным статистическим данным могут быть получены значения параметров потока отказов  $\omega(t)$ .

Согласно определению, параметр потока отказов есть отношение числа отказавших изделий за интервал времени  $n(dt)$  к числу испытываемых изделий за этот интервал  $dt$  при условии, что отказавшие изделия заменяются исправными (новыми или отремонтированными), то есть

$\omega(t) = n(dt)/Ndt$ , где  $N$  – число испытываемых изделий, которое остается постоянным. Из теории надежности известно, что параметр потока отказов при любом виде распределения стремится к стационарному значению

$$\omega = 1/T,$$

где  $T$  – наработка на отказ. Это и проявляется при сборе статистических данных об отказах аппаратуры в реальных условиях эксплуатации.

Хотя численные значения параметра потока отказов аппаратуры представлены в [3] как постоянные величины, это не означает, что интенсивность отказов  $\lambda(t)$  ее тоже постоянна, поскольку аппаратура является стареющим изделием. Согласно определению, интенсивность отказов есть отношение числа отказавших изделий за интервал времени  $n(dt)$  к среднему числу изделий  $N_{cp}$ , исправно проработавших в данный интервал времени  $dt$ , то есть  $\lambda(t) = n(dt)/N_{cp} dt$ . При этом  $N_{cp}$  из-за отказов изделий с каждым интервалом уменьшается, а  $\lambda(t)$  стареющих изделий – возрастает.

В [3] подробно описаны деградационные процессы, которые вызывают износ и старение элементов ЖАТ, в том числе аппаратуры. Подобные процессы приводят к постепенным отказам и описываются в теории надежности классом распределений, имеющих возрастающую функцию интенсивности отказов (ВФИ-распределения).

Для определения распределения наработки на отказ аппаратуры ЖАТ может быть применен метод [4], суть которого заключается в следующем. Когда удастся оценить только значение наработки на отказ, например, из выражения  $T = 1/\omega$ , то можно предложить следующий метод приближенного описания функции  $\omega(t)$ . Поскольку параметр потока отказов при  $t = T$  приближается к своему стационарному значению, равному  $1/T$ , предлагается аппроксимировать зависимость  $\omega(t)$  кусочно-линейной функцией вида: при  $t < T$   $\omega(t) = t/T^2$ ; при  $t \geq T$   $\omega(t) = 1/T$ .

Остальные показатели определяются с использованием преобразования Лапласа. Плотность распределения  $f(t)$  найдем из уравнения, связывающего ее в операторной форме с параметром потока отказов  $f(s) = \omega(s)/(1+\omega(s))$  как  $f(t) = (1/T)\sin(t/T)$ . Тогда вероятность безотказной работы  $P(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda(t)$  определим из выражений [4]

$$P(t) = \cos(t/T); \quad \lambda(t) = (1/T) \operatorname{tg}(t/T). \quad (3)$$

Аргумент  $t/T$  в формулах для определения показателей надежности измеряется в радианах. Назовем полученное распределение распределением косинуса, область определения которого лежит в интервале  $0 < t/T < \pi/2$ . Интенсивность отказов этого распределения является монотонно возрастающей функцией времени (3), а значение коэффициента вариации равно  $V = (\pi - 3)^{0,5} \approx 0,375$  [4], то есть менее единицы. Поэтому оно относится к классу ВФИ-

распределений и может использоваться для описания постепенных отказов аппаратуры ЖАТ.

### Исследование математических моделей

Подставив значение вероятности безотказной работы из (3) в выражения (1,а) и (2,а), взяв производную и приравняв ее к нулю, получим формулы для определения оптимальных относительных значений периодичности замен  $x_o$  и удельных эксплуатационных затрат  $y_o$  в безразмерном виде как

$$x_{o1} = \arccos(1 - \gamma); \quad y_{o1} = \sin x_o. \quad (1 б)$$

$$1 - (\cos(x_{o2} + a)\cos a) / (1 - \sin(x_{o2} + a)\sin a) = \gamma_1 / \beta;$$

$$y_{o2} = (\beta - \gamma_1) \operatorname{tg}(x_{o2} + a). \quad (2 б)$$

Как видно из выражений (1,б), для определения  $x_{o1}$  и  $y_{o1}$  при стратегии 1 достаточно знать только значение коэффициента стоимости  $\gamma$ . Для определения  $x_{o2}$  и  $y_{o2}$  при стратегии 2 с использованием уравнений (2,б) достаточно знать значения коэффициентов стоимости  $\beta$ ,  $\gamma_1$  и глубины восстановления надежности  $a$ . На рис. 1 представлены зависимости оптимальных значений периодичности замен  $x_o$  от коэффициента стоимости  $\gamma$ , вычисленные с использованием уравнения (1,б), и от соотношения стоимостей  $\gamma_1 / \beta$  при разных значениях глубины восстановления  $a$ , вычисленные с использованием уравнения (2,б). Из кривых, представленных на рис. 1, видно, что при увеличении глубины восстановления надежности (снижении параметра  $a$ ) оптимальные значения периодичности замен аппаратуры возрастают.

Абсолютные значения оптимальной периодичности замен  $\tau_o$  и оптимальных удельных эксплуатационных затрат  $C_o$  определяются из выражений

$$\tau_{o1} = T x_{o1}; \quad \tau_{o2} = T x_{o2}; \quad C_{o1} = y_{o1} A/T; \quad C_{o2} = y_{o2} A/T.$$

Для анализа эффективности и выбора рациональной стратегии проведем сравнения стратегий 1 и 2 при естественном предположении, что в рамках каждой стратегии техническое содержание аппаратуры ЖАТ ведется оптимальным способом. Использование для замены отремонтированной в РТУ аппаратуры будет эффективнее, чем использование для замены новой аппаратуры, при выполнении условия  $y_{o2}/y_{o1} < 1$ .

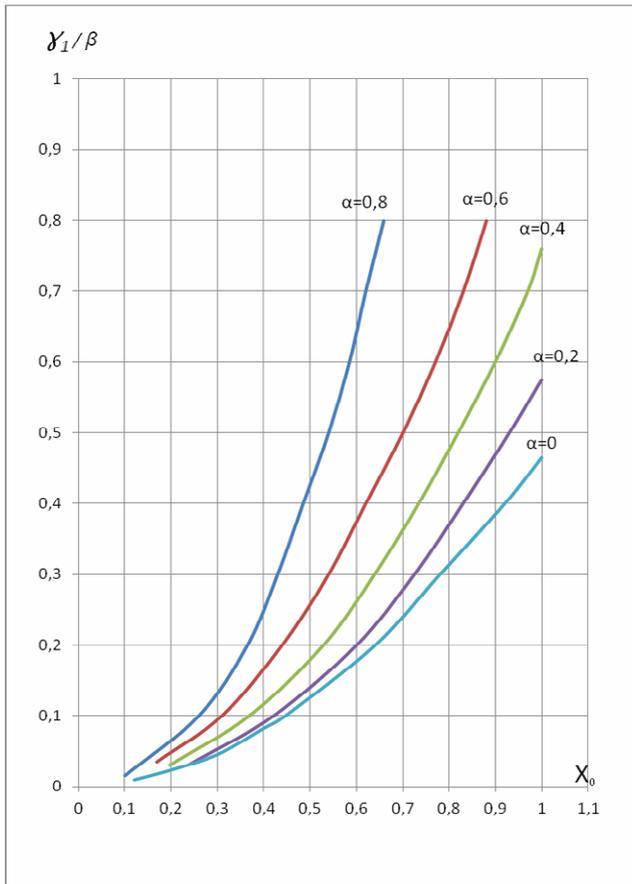


Рис. 1. Кривые зависимости оптимальных значений периодичности замен  $x_0$  от соотношения стоимостей  $\gamma_1/\beta$  при разных значениях глубины восстановления  $\alpha$

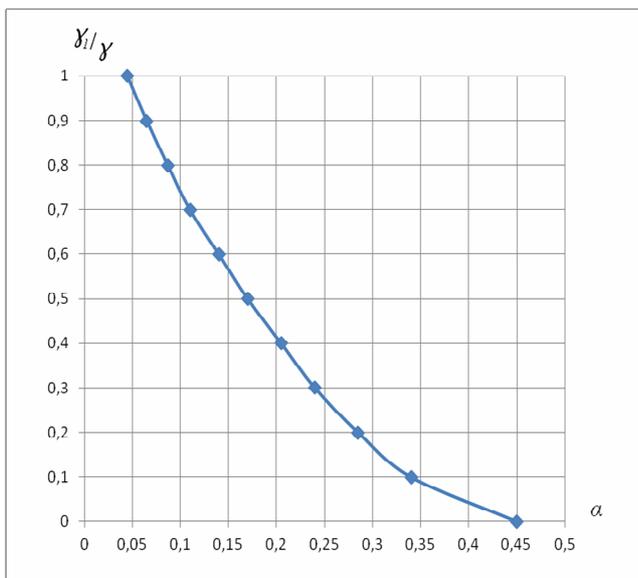


Рис. 2. Граничная кривая зависимости соотношения стоимости отремонтированной аппаратуры к стоимости новой аппаратуры  $\gamma_1/\gamma$  от глубины восстановления надежности  $\alpha$

На рис. 2 представлена граничная кривая зависимости соотношения стоимости отремонтированной аппаратуры к стоимости новой аппаратуры  $\gamma_1/\gamma$  от глубины восстановления надежности  $\alpha$ , построенная с использованием выражений (1, б) и (2, б). Ниже этой кривой целесообразно для замены использовать отремонтированную аппаратуру, а выше – новую аппаратуру ЖАТ.

### Заключение

Как видно из полученных результатов, задача определения периодичности предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат при использовании для описания отказов распределения косинуса решается в аналитическом виде.

### Литература

1. Инструкция по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки [Текст]. – Утверждена распоряжением ОАО РЖД от 17.04.2014, № 939 р.
2. Володарский, В.А. К вопросу оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств [Текст] / В.А. Володарский // Надежность. – 2011. - № 2. – С.49-59.
3. Сапожников, В.В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст] / В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, В.И. Шаманов. – М.: Маршрут, 2003. – 263 с.
4. Володарский, В.А. Определение параметров распределений наработки на отказ элементов систем железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / В.А. Володарский // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – Вып. 14. – С.85-89.

**Volodarsky V.A. Optimizing technical content of the equipment of automatics and telemechanics.** The method to determine the frequency of preventive replacements of equipment of railway automation and telemechanics on the criterion of minimum unit operating costs. Consider three possible strategies and their corresponding mathematical optimization model the technical content of the equipment according to this criterion.

The curves of the dependences for determination of optimal values of the frequency of substitutions the ratio of the cost factors with different values of the depth of restoration of reliability. To select a rational strategy presents the boundary curve according to the ratio of the

value of the repaired equipment to the cost of new equipment from the depth recovery secure.

From the obtained results that the problem of determining the frequency of preventive replacements of equipment of railway automation and remote control, with the criterion of minimum unit operating costs when used to describe her failure of the distribution of the cosine is solved in analytical form.

**Key words:** strategy, replacement, repair, frequency, cost per unit, optimization.

Рецензент д.т.н., професор Бойник А.Б. (УкрГУЖТ)

*Поступила 06.04.2016 з.*

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