

УДК 621.3.019

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 λ .

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 τ проводиться попередня заміна її новою апаратурою ціною B . Якщо стався відмова апаратури, то проводиться аварійна заміна новою апаратурою ціною A , а чергова попередня заміна переноситься. Математична модель як функція удільних експлуатаційних витрат від періодичності попередніх заміни при цій стратегії визначається згідно [2] з виразу

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

При значенні $\tau \rightarrow \infty$ отримуємо нульову стратегію.

При $A=B$ удільні експлуатаційні витрати будуть рівні $C(\tau)_1 = A / \int_0^\tau P(t)dt$, мінімальне значення яких досягається тільки при значенні $\tau \rightarrow \infty$, коли $C = A/T$.

Стратегія 2 відрізняється від стратегії 1 тим, що замість заміни новою апаратурою проводиться аварійна заміна ціною A_1 або попередня заміна ціною B_1 апаратурою, відремонтованою в РТУ до віку a . Математична модель при цій стратегії визначається з виразу [2]

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

Як окремий випадок при $a = 0$, коли $A_1 = A$ і $B_1 = B$, отримуємо математичну модель при стратегії 1.

Очевидно, що застосування стратегії 2 буде вигідно, тільки тоді коли ціна відремонтованої в РТУ апаратури буде нижче ціни нової апаратури.

Приведемо вирази (1) і (2) до безрозмірного вигляду, розділив їх

на значення удільних експлуатаційних витрат при нульовій стратегії C . Тоді одержимо математичні моделі в безрозмірному вигляді

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

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

де y_1 і y_2 – удільні експлуатаційні витрати при стратегіях 1 і 2 в безрозмірному вигляді;

$x = \tau/T$ – періодичність попередніх заміни в одиницях наробітку до відмови;

$u = t/T$ – час експлуатації в одиницях наробітку до відмови;

$a = a/T$ – глибина відновлення в одиницях наробітку до відмови;

$\gamma = B/A$ – коефіцієнт ціни попередніх заміни новою апаратурою;

$\beta = A_1/A$ – коефіцієнт ціни аварійних заміни відремонтованої апаратури;

$\gamma_1 = B_1/A$ – коефіцієнт ціни попередніх заміни відремонтованої апаратури.

Визначення початкових даних

При розв'язанні завдань оптимізації періодичності попередніх заміни необхідно знати як цінові показники, так і закони розподілу наробітку апаратури до відмови. Ціна нової і відремонтованої в РТУ апаратури однозначно визначається нормативними документами. Труднощі виникають при визначенні ціни аварійних заміни, в яку входить шкода від зупинки і затримки поїздів і які мають ймовірнісний характер. При цьому може бути використана методика розрахунку шкоди, викладена в [3]. В разі неповноти початкових даних для оцінки коефіцієнтів ціни γ , γ_1 і β може бути застосований метод експертних оцінок.

Особливі труднощі виникають з визначенням законів розподілу наробітку апаратури до відмови. Як зазначається в [3], проведення для цієї мети спеціальних випробувань потребує великих витрат часу і коштів, а іноді і просто неможливо. Тому показники надійності апаратури визначаються шляхом збору і обробки інформації про відмови в умовах експлуатації. Оскільки апаратура є відновлюваним виробом, коли після кожної відмови проводиться її заміна, то за експлуатаційними статистичними даними можуть бути отримані значення параметрів потоку відмов $\omega(t)$.

Згідно визначенню, параметр потоку відмов є відношенням числа відмовивших виробів за інтервал часу $n(dt)$ до числа випробуваних виробів за цей інтервал dt при умові, що відмовивші вироби замінюються исправними (новими або відремонтованими), тобто

$\omega(t) = n(dt)/Ndt$, де N – число випробуваних виробів, яке залишається постійним. З теорії надійності відомо, що параметр потоку відмов при будь-якому виді розподілу прагне до стаціонарного значення

$$\omega = 1/T,$$

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 γ . Для определения x_{o2} и y_{o2} при стратегии 2 с использованием уравнений (2,б) достаточно знать значения коэффициентов стоимости β , γ_1 и глубины восстановления надежности a . На рис. 1 представлены зависимости оптимальных значений периодичности замен x_o от коэффициента стоимости γ , вычисленные с использованием уравнения (1,б), и от соотношения стоимостей γ_1 / β 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 τ_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 $y_{o2}/y_{o1} < 1$.

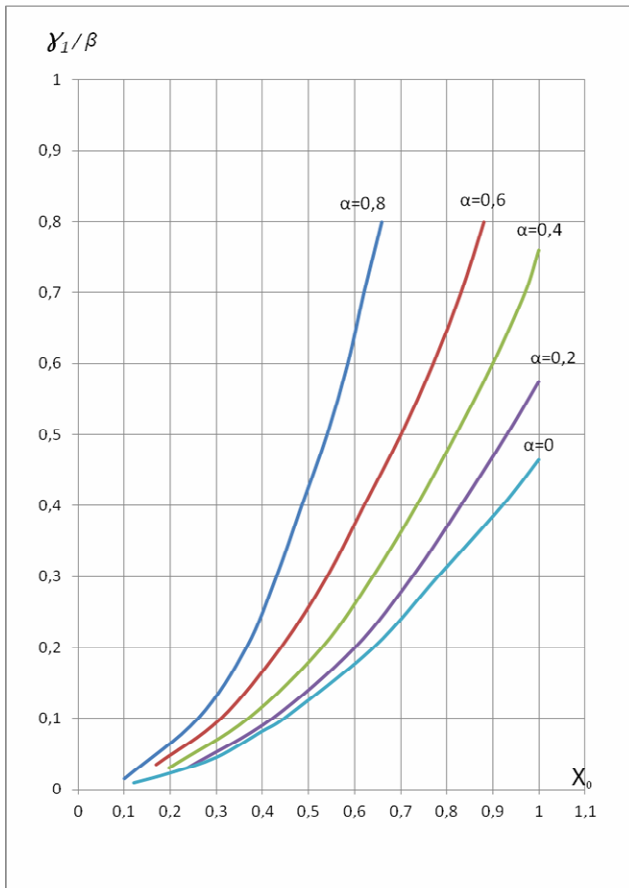


Рис. 1. Кривые зависимости оптимальных значений периодичности замен x_0 от соотношения стоимостей γ_1 / β при разных значениях глубины восстановления α

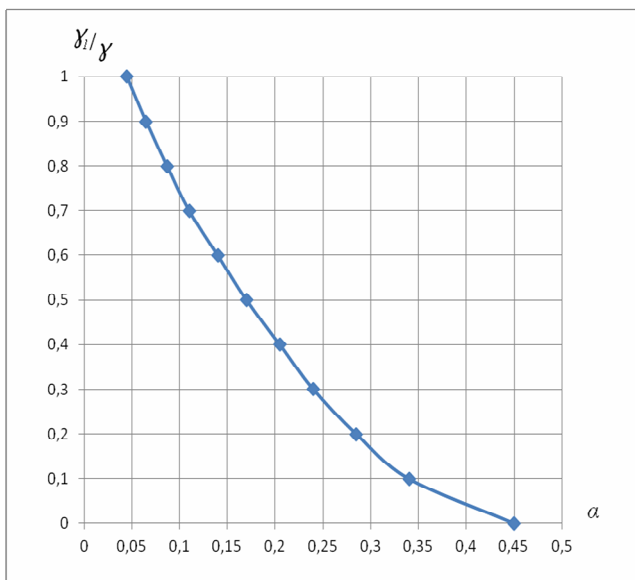


Рис. 2. Граничная кривая зависимости соотношения стоимости отремонтированной аппаратуры к стоимости новой аппаратуры γ_1 / γ от глубины восстановления надежности α

На рис. 2 представлена граничная кривая зависимости соотношения стоимости отремонтированной аппаратуры к стоимости новой аппаратуры γ_1 / γ от глубины восстановления надежности α , 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 г.

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