

Живучесть, надежность, безопасность

УДК 621.3.019

В. А. Володарский, канд. техн. наук

Кафедра «Системы обеспечения движения поездов»,
Красноярский институт железнодорожного транспорта

СТРАТЕГИИ, КРИТЕРИИ И РАСЧЕТ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАМЕН АППАРАТУРЫ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Представлен метод оптимизации периодичности предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики по экономическому критерию (минимум удельных эксплуатационных затрат) и критерию надежности (допустимое значение интенсивности отказов). Глубину восстановления надежности после ремонта аппаратуры предложено оценивать как разницу между доремонтным и межремонтным ресурсом.

Рассмотрены возможные стратегии и соответствующие им математические модели оптимизации технического содержания аппаратуры по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат.

Изложен метод получения стоимостных показателей и распределения наработки аппаратуры на отказ. Представлены выражения для определения значений периодичности предупредительных замен по экономическому критерию и критерию надежности.

В результате исследований получены кривые зависимостей оптимальных значений периодичности замен от стоимости при разных значениях глубины восстановления надежности аппаратуры. Представлена граничная кривая зависимости стоимости замен отремонтированной и новой аппаратуры от глубины восстановления надежности.

Установлено, что задача определения периодичности предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат и по критерию допустимого значения интенсивности отказов решается в аналитическом виде.

замена; ремонт; периодичность; удельные затраты; оптимизация; интенсивность отказов

Введение

Под техническим содержанием, согласно [1], будем понимать совокупность мероприятий, направленных на поддержание и восстановление работоспособного состояния техники и восстановление ее ресурса. Согласно инструкции [2] техническое содержание аппаратуры железнодорожной авто-

матики и телемеханики определяется периодическими заменами, с последующим ремонтом и проверкой ее в ремонтно-технических участках дистанций. В отдельных случаях замена может проводиться не на отремонтированную, а на новую аппаратуру.

Плановая замена аппаратуры производится в свободное от движения поездов время. Аварийная замена аппаратуры при ее отказах, как правило, вызывает сбои и задержки в движении поездов, что приводит к материальному ущербу, поэтому плановая предупредительная замена аппаратуры должна быть экономически обоснована.

Важной характеристикой аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики является ее безопасность как свойство не допускать опасных для движения поездов отказов [3]. Периодические ее замены повышают надежность и, как следствие, безопасность.

При определении необходимой периодичности предупредительных замен аппаратуры ЖАТ нужно исходить из двух критериев:

- 1) экономического – минимума удельных эксплуатационных затрат C ;
- 2) надежности – допустимого значения интенсивности отказов λ_g .

Известно, что при ремонте аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики возвращается лишь часть исходных свойств надежности.

Цель статьи – предложить метод определения оптимальной периодичности предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики по вышеназванным критериям с учетом глубины восстановления надежности.

1 Учет глубины восстановления надежности

В настоящее время разработана только методика замен технических устройств [4], когда полностью восстанавливается их первоначальная надежность. При ремонте технических устройств им обычно возвращается лишь часть исходной надежности. В связи с этим в нашей стране и за рубежом уделяется определенное внимание учету глубины восстановления надежности при обслуживании технических систем. Так, в [5] надежность работы системы исследуется при возникновении отказов двух типов. Отказы первого типа устраняются с помощью минимального ремонта, не изменяющего надежность системы, а отказы второго типа – путем замены, полностью возвращающей надежность системе. В [6] при разработке математической модели замены электрооборудования учтена неравноценность отказов, которые разделены на две группы: восстанавливаемые, устраняемые в порядке ремонта, и невосстанавливаемые, устраняемые путем замены. В [7] несовершенство профилактического обслуживания предлагается оценивать вероятностью того, что плановое воздействие приведет систему в состояние, аналогичное новому со-

стоянию, и вероятностью того, что это воздействие не обновит систему. В [8] также учитывается вероятность того, что профилактическое обслуживание несовершенно и система зачастую дает после него отказ. В перечисленных публикациях в расчет принимаются только два крайних случая глубины восстановления надежности систем – никакого обновления и полное обновление. Практический же интерес представляют промежуточные значения глубины восстановления надежности между этими крайними случаями.

Естественный процесс старения и износа в [9] учитывается по возрастанию отказов в каждом последующем межремонтном интервале. В моделях управления надежностью авиационной техники [10] полнота профилактических мероприятий оценивается по изменению интенсивности отказов различных элементов. В [11] в процессе профилактического обслуживания предлагается учитывать фактор улучшения, оцениваемый экспертным путем. Вопросы учета глубины восстановления надежности рассматривались в перечисленных публикациях только на теоретическом уровне.

Относительно лучше вопросы оценки глубины восстановления надежности решаются при ремонте машин в сельском хозяйстве, где оперируют понятием степени восстановления ресурса при капитальном ремонте [12].

В соответствии с [13] глубину восстановления надежности после ремонта аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики будем оценивать как разницу между ее доремонтным и межремонтным ресурсом:

$$a = T_{\text{др}} - T_{\text{мр}},$$

где a – глубина восстановления надежности; $T_{\text{др}}$ – доремонтный ресурс; $T_{\text{мр}}$ – межремонтный ресурс.

Как видно, глубину восстановления надежности аппаратуры предлагается оценивать по ее «возрасту». Очевидно, что новая аппаратура будет иметь нулевой «возраст», т. е. глубина восстановления надежности у нее $a = 0$.

2 Стратегии и математические модели по экономическому критерию

При *нулевой стратегии* предупредительные замены не производятся, а при отказах, с учетом средней наработки T , выполняются аварийные замены новой аппаратурой, в стоимости которых учтен ущерб 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 стоимости предупредительной замены B и аварийной замены A равны.

Нулевая стратегия является частным случаем рассматриваемых ниже стратегий при периодичности предупредительных замен $\tau \rightarrow \infty$. Поэтому она принимается за базовую для приведения математических моделей при стратегиях 1 и 2 к безразмерному виду, что удобно при их сравнении и исследовании.

Стратегия 1 заключается в следующем. Если отказа аппаратуры не было, то спустя время τ производится предупредительная замена ее новой аппаратурой стоимостью B . Если произошел отказ аппаратуры – производится аварийная замена ее новой аппаратурой, в стоимости которой учтен ущерб от простоя поездов A , а очередная предупредительная замена переносится. Математическая модель как функция удельных эксплуатационных затрат от периодичности предупредительных замен при этой стратегии определяется согласно [13] из выражения

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

При $\tau \rightarrow \infty$ из (1) получаем $C = A/T$, что соответствует нулевой стратегии.

При $A = B$, когда отказ аппаратуры не приводит к простоям поездов, из (1) получаем удельные эксплуатационные затраты $C(\tau)_1 = A / \int_0^{\tau} P(t) dt$, минимальное значение которых достигается только при значении $\tau \rightarrow \infty$, когда $C = A/T$, что также соответствует нулевой стратегии.

Стратегия 2 отличается от стратегии 1 тем, что вместо замены на новую аппаратуру производится аварийная замена, в стоимости которой учтен ущерб от простоя поездов A_1 , или предупредительная замена стоимостью B_1 на аппаратуру, отремонтированную в ремонтно-техническом участке (РТУ) с глубиной восстановления надежности a . Математическая модель при этой стратегии определяется из выражения [13]:

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

Как частный случай при $a = 0$, когда $A_1 = A$ и $B_1 = B$, из (2) получаем математическую модель (1).

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

Приведем выражения (1) и (2) к безразмерному виду, разделив их на значение удельных эксплуатационных затрат при нулевой стратегии C . Получим математические модели в безразмерном виде:

$$y_1 = C(\tau)_1 / C = (1 - (1 - \gamma) P(x)) / \int_0^x P(u) du; \quad (3)$$

$$y_2 = C(\tau)_2/C = ((\beta P(a) - (\beta - \gamma_1) P(x + a)) / \int_0^x P(u + a) du), \quad (4)$$

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 на новую аппаратуру; $\beta = A_1/A$ – коэффициент стоимости аварийных замен на отремонтированную аппаратуру; $\gamma_1 = B_1/A$ – коэффициент стоимости предупредительных замен на отремонтированную аппаратуру.

3 Исходные данные

При решении задач оптимизации периодичности предупредительных замен необходимо знать как стоимостные показатели, так и законы распределения наработки аппаратуры на отказ. Стоимость новой аппаратуры определяется по нормативным документам. Стоимость отремонтированной в РТУ аппаратуры определяется в соответствии с объемом выполненных работ по восстановлению ее ресурса. Трудности возникают при определении стоимости аварийных замен, в которой учитывается ущерб от сбоя движения и задержек поездов, эти замены носят вероятностный характер. При этом может быть использована методика расчета ущерба, изложенная в [3]. В случае неполноты исходных данных для оценки коэффициентов стоимости γ , γ_1 , и β может быть применен метод экспертных оценок.

Особые трудности возникают с распределением наработки аппаратуры на отказ. Как отмечается в [3], проведение для этой цели специальных испытаний требует больших затрат времени и средств, а иногда просто невозможно. Поэтому показатели надежности аппаратуры определяются путем сбора и обработки информации об отказах в условиях эксплуатации. Поскольку изделия аппаратуры являются восстанавливаемыми, то по эксплуатационным статистическим данным могут быть получены параметры потока отказов $\omega(t)$.

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), т. е.

$$\omega(t) = n(dt)/Ndt,$$

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 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 изделия аппаратуры являются стареющими. 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 , т. е. $\lambda(t) = n(dt)/N_{cp} dt$. При этом N_{cp} из-за отказов изделий с каждым интервалом уменьшается, а $\lambda(t)$ стареющих изделий возрастает.

В [3] подробно описаны деградиационные процессы, которые вызывают износ и старение элементов железнодорожной автоматики и телемеханики, в том числе аппаратуры. Подобные процессы приводят к постепенным отказам и описываются в теории надежности как распределения, имеющие возрастающую функцию интенсивности отказов (ВФИ-распределения).

Для того чтобы определить распределение наработки на отказ аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики, когда удастся оценить только значение наработки на отказ, например из выражения $T = 1/\omega$, можно предложить метод приближенного описания функции $\omega(t)$ [14]. Поскольку параметр потока отказов при $t = T$ приближается к своему стационарному значению, равному $1/T$, предлагается аппроксимировать зависимость $\omega(t)$ кусочно-линейной функцией следующего 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 [14]:

$$P(t) = \cos(t/T); \lambda(t) = (1/T) \operatorname{tg}(t/T). \quad (5)$$

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 (5), а значение коэффициента вариации $V = (\pi - 3)^{0.5} \approx 0,375$ [14], т. е. менее единицы. Поэтому оно относится к классу ВФИ-распределений и может использоваться для описания постепенных отказов аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики.

4 Исследование математических моделей

Подставив значение вероятности безотказной работы из (5) в выражения (3) и (4) и приравняв производную к нулю, получим формулы для определения оптимальных относительных значений периодичности замен x_0 и удельных эксплуатационных затрат y_0 в безразмерном виде:

$$x_{o1} = \arccos(1 - \gamma); y_{o1} = \sin x_{o1}; \quad (6)$$

$$1 - (\cos(x_{o2} + a)\cos a) / (1 - \sin(x_{o2} + a)\sin a) = \gamma_1/\beta; \\ y_{o2} = (\beta - \gamma_1) \operatorname{tg}(x_{o2} + a). \quad (7)$$

Как видно из выражений (6) 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 (7) достаточно знать значения коэффициентов стоимости β , γ_1 и глубины восстановления надежности a . На рис. 1 представлены зависимости оптимальных значений периодичности замен x_0 от коэффициента стоимости γ , вычисленные с использованием уравнения (6), и от соотношения стоимостей γ_1/β при разных значениях глубины восстановления a , вычисленные с использованием уравнения (7). При рассмотрении кривых, представленных на рис. 1, видно, что при увеличении глубины восстановления надежности (уменьшение величины параметра a) оптимальная периодичность замен аппаратуры возрастает.

Абсолютные значения оптимальной частоты замен τ_0 и оптимальных удельных эксплуатационных затрат C_0 определяются из выражений:

$$\tau_{o1} = T x_{o1}; \tau_{o2} = T x_{o2}; C_{o1} = y_{o1} A/T; C_{o2} = y_{o2} A/T. \quad (8)$$

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

На рис. 2 представлена граничная кривая зависимости соотношения стоимости отремонтированной аппаратуры и стоимости новой аппаратуры γ_1/γ от глубины восстановления надежности a , построенная с использованием выражений (6) и (7). Ниже этой кривой целесообразно для замены использование отремонтированной аппаратуры, а выше – новой аппаратуры.

5 Определение периодичности замен по критерию надежности

Периодичность предупредительных замен τ_g по заданному согласно [2, 3] допустимому значению интенсивности отказов λ_g аппаратуры

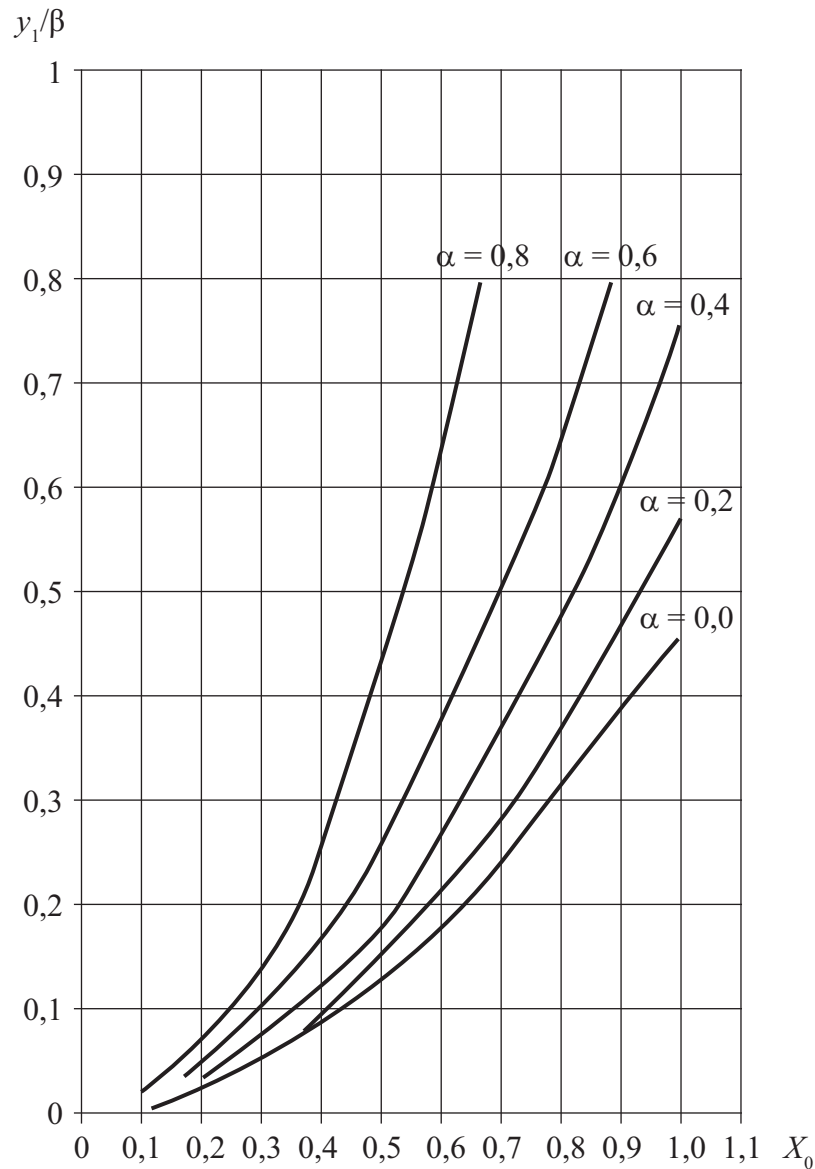


Рис. 1. Зависимости оптимальных значений частоты замен от соотношения стоимости при разных значениях глубины восстановления надежности

железнодорожной автоматики и телемеханики определяется из следующих выражений [15]:

– при использовании новой аппаратуры:

$$x_{g1} = \arctg \lambda_g; \tau_{g1} = T x_{g1}; \quad (9)$$

– при использовании отремонтированной аппаратуры:

$$x_{g2} = \arctg \lambda_g - \alpha; \tau_{g2} = T x_{g2}. \quad (10)$$

Как видно из выражений (9) и (10), задача определения периодичности предупредительных замен аппаратуры по критерию безотказности при

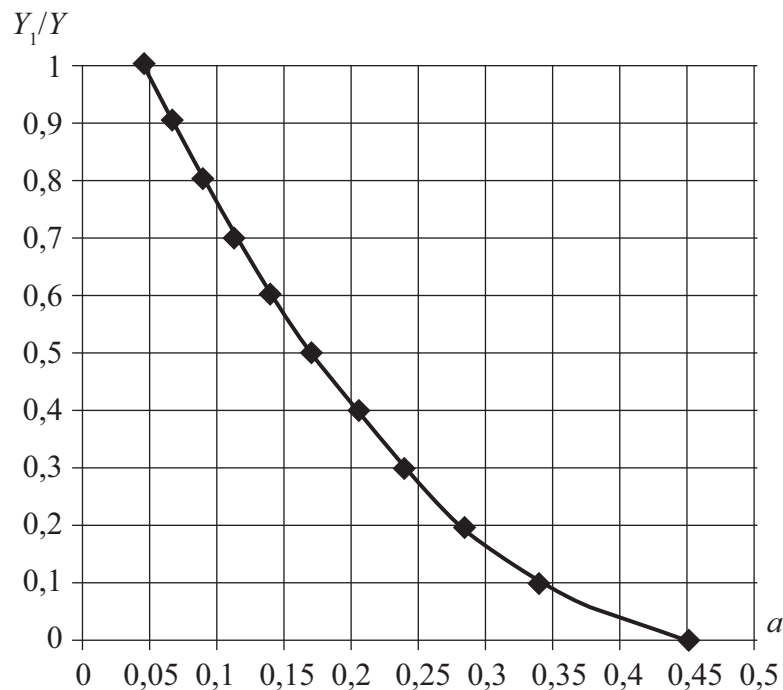


Рис. 2. Граничная кривая зависимости отношения стоимости замен на отремонтированную и новую аппаратуру от глубины восстановления надежности

использовании для описания отказов распределения косинуса решается в аналитическом виде.

Заключение

При выборе рациональной стратегии предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики необходимо исходить из двух критериев: экономического – минимума удельных эксплуатационных затрат; надежности – допустимого значения интенсивности отказов.

Глубину восстановления надежности после ремонта аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики целесообразно оценивать как разницу между ее доремонтным и межремонтным ресурсом.

Для аппаратуры, непосредственно не влияющей на безопасность движения поездов, периодичность предупредительных замен целесообразно определять с использованием критерия минимума удельных эксплуатационных затрат. При этом могут быть использованы выражения (6)–(8), а также зависимости оптимальных значений периодичности замен от отношения стоимостей при разных значениях глубины восстановления надежности. Для выбора рациональной стратегии представлена граничная кривая зависимости отношения стоимости замен на отремонтированную и новую аппаратуру от глубины восстановления надежности.

Для аппаратуры, влияющей на безопасность движения поездов, периодичность предупредительных замен необходимо определять с помощью критерия допустимого значения интенсивности отказов. При этом могут быть использованы выражения (9) и (10).

Задача определения периодичности предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики при использовании для описания отказов распределения косинуса решается в аналитическом виде.

Библиографический список

1. ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – [М., 2013].
2. Инструкция по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки : утв. распоряжением ОАО РЖД от 17.04.2014, № 939 р. – [М., 2014].
3. Сапожников Вал. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М. : Маршрут, 2003. – 263 с.
4. Методика оптимизации периодичности проведения замен технических устройств. – М. : Издательство стандартов, 1975. – 21 с.
5. Beichelt T. General failure model applied to preventive maintenance policies / T. Beichelt, K. Fisher // IEEE Transactions on reliability. – 2011. – Vol. R-29. – N 1. – Pp. 39–41.
6. Разгильдеев Г. И. Математическая модель замены электрооборудования с учетом неравноценности отказов / Г. И. Разгильдеев, А. Г. Захарова // Известия вузов. Энергетика. – 2011. – № 9. – С. 79–84.
7. Helvik B. Periodic maintenance on the effect of imperfectness / B. Helvik // 10th Int. Symp. Fault Tolerant Comput. Kyoto, 1–3 Oct., 2012. – Pp. 204–206.
8. Murthy D. N. P. Optimal age – policy with imperfect preventive maintenance / D. N. P. Murthy, D. G. Ngugen // IEEE Transactions on reliability. – 2013. – Vol. R-30. – N 1. – Pp. 80–81.
9. Рудь Ю. С. Оптимизация технического обслуживания технологического оборудования горно-обогатительных комбинатов / Ю. С. Рудь // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 12. – С. 47–51.
10. Моломин В. П. Управление надежностью авиационной техники / В. П. Моломин. – М. : Машиностроение, 2001. – 200 с.
11. Malik M. A. K. Reliable preventive maintenance scheduling / M. A. K. Malik // AIP Trans. – 2013. – Vol. 11. – Pp. 221–228.
12. Черепанов С. С. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве / С. С. Черепанов. – М. : Колос, 2009. – 288 с.
13. Володарский В. А. К вопросу оптимизации периодичности предупредительных замен и ремонтов технических устройств / В. А. Володарский // Надежность. – 2011. – № 2. – С. 49–59.

14. Володарский В. А. О тригонометрических распределениях для описания отказов технических устройств / В. А. Володарский // Надежность. – 2016. – № 2. – С. 16–19.
15. Володарский В. А. Определение параметров системы предупредительных замен и ремонтов при допустимом значении интенсивности отказов / В. А. Володарский // Надежность. – 2015. – № 3. – С. 28–31.

Vladislav A. Volodarsky
«Trains provision systems» department
Krasnoyarsk institute of railway transport

Strategies, criteria and calculation of replacement periodicity of automation and remote control equipment

A method for optimizing the frequency of precautionary replacements of railway automation and remote control equipment based on the economic criterion – the minimum of specific operating costs – and the reliability criterion – the permissible value of the failure rate, is presented. The depth of restoration of reliability after repair of equipment is proposed to be estimated as the difference between the pre-repair and overhaul life.

Possible strategies and corresponding mathematical models for optimizing the technical content of the equipment are considered based on the criterion of the minimum specific operating costs. The method of obtaining cost indicators and distribution of the operating time of the equipment for failure is described. Expressions are given for determining the values of the frequency of precautionary substitutions by economic and reliability criteria.

As a result of the research, curves of the dependences of the optimal values of the periodicity of substitutions on the cost were obtained for different values of the depth of restoration of the equipment reliability. A boundary curve is presented for the dependence of the cost of replacing the repaired and new equipment on the depth of restoration of reliability.

It is established that the task of determining the periodicity of precautionary changes in the equipment of railway automation and remote control according to the criterion of the minimum specific operating costs and by the criterion of the permissible value of the failure rate is solved analytically.

replacement, repair, periodicity, unit costs, optimization, failure rate

References

1. GOST 32192–2013. Dependability in railway technics. General concepts. Terms and definitions. [GOST 32192–2013. Nadezhnost' v zheleznodorozhnoj tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya], Moscow.
2. Operating instructions for signaling systems and devices approved by JSC «RZD» order of April 17, 2014 [Instrukciya po tekhnicheskoy ehkspluatacii ustrojstv i sistem signalizacii, centralizacii i blokirovki, utverzhdannaya rasporyazheniem OAO RZHD ot 17.04.2014], N 939r.
3. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Shamanov V. I. (2003). Reliability of railway automation, remote control and communication systems [Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi]. Moscow, Route [Marshrut]. – 263 p.
4. Methodology of optimization of technical equipment replacement periodicity (1975) [Metodika optimizacii periodichnosti provedeniya zamen tekhnicheskikh ustrojstv]. – Moscow, Publishing House of Standards [Izdatel'stvo standartov]. – 21 p.
5. Beichelt T., Fisher K. (2011). General failure model applied to preventive maintenance policies. IEEE Transactions on reliability, vol. R-29, N 1. – Pp. 39–41.
6. Razgil'deev G. I., Zaharova A. G. (2011). Mathematical model of electric equipment replacement considering inequality of faults [Matematicheskaya model' zameny ehlektrooborudovaniya s uchetom neravnocennosti otkazov]. Proceedings of universities. Power engineering [Izvestiya vuzov. EHnergetika], issue 9. – Pp. 79–84.
7. Helvik B. (2012). Periodic maintenance on the effect of imperfectness. 10th Int. Symp. Fault Tolerant Comput. Kyoto, Oct. 1–3. – Pp. 204–206.
8. Murthy D. N. P., Ngugen D. G. (2013). Optimal age – policy with imperfect preventive maintenance. IEEE Transactions on reliability, vol. R-30, N 1. – Pp. 80–81.
9. Rud' Yu. S. (2012). Optimization of mining and processing enterprises equipment maintenance [Optimizaciya tekhnicheskogo obsluzhivaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya gorno-obogatitel'nyh kombinatov]. Proceedings of universities. Mining journal [Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal], issue 12. – Pp. 47–51.
10. Molomin V. P. (2001). Control of aircraft technology reliability [Upravlenie nadezhnost'yu aviacionnoj tekhniki]. Moscow, Mechanical Engineering [Mashinostroenie]. – 200 p.
11. Malik M. A. K. (2013). Reliable preventive maintenance scheduling. AIIE Trans, vol. 11. – Pp. 221–228.
12. Cherepanov S. S. (2009). Maintenance and repair of machines in agriculture [Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont mashin v sel'skom hozyajstve]. Moscow, Ear [Kolos]. – 288 p.
13. Volodarskij V. A. (2011). On the problem of optimization technical equipment preventative replacement and repair periodicity [K voprosu optimizacii periodichnosti predupreditel'nyh zamen i remontov tekhnicheskikh ustrojstv]. Reliability [Nadezhnost'], issue 2. – Pp. 49–59.
14. Volodarskij V. A. (2016) On the trigonometric distribution of technical devices failures description [O trigonometriceskikh raspredeleniyah dlya opisaniya otkazov tekhnicheskikh ustrojstv]. Reliability [Nadezhnost'], issue 2. – Pp. 16–19.

15. Volodarskij V.A. (2015). Determination of parameters of preventative replacement and repair with permissible value of failure rate [Определение параметров системы предупредительных замен и ремонтов при допустимом значении интенсивности отказов]. Reliability [Надежность], issue 3. – Pp. 28–31.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым
Поступила в редакцию 10.08.2016, принята к публикации 30.09.2016*

ВОЛОДАРСКИЙ Владислав Афанасьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Системы обеспечения движения поездов» Красноярского института железнодорожного транспорта.
e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

© Володарский В. А., 2017