

УДК 621.3.019

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

Исследование надежности ремонтируемой аппаратуры автоматики и телемеханики

Приведены результаты исследований зависимости средней интенсивности отказов и средней наработки на отказ ремонтируемой аппаратуры автоматики и телемеханики от периодичности предупредительных замен и глубины восстановления надежности, а также от коэффициента вариации распределений, используемых для описания отказов аппаратуры.

Установлено, что значение средней интенсивности отказов с уменьшением периодичности и количества замен отремонтированной аппаратурой до замены новой аппаратурой снижается, а с уменьшением глубины восстановления надежности аппаратуры возрастает. Варьируя глубину восстановления надежности или периодичность и количество замен отремонтированной аппаратурой до замены новой аппаратурой, можно обеспечить заданное значение средней интенсивности отказов аппаратуры автоматики и телемеханики.

Наработка на отказ аппаратуры существенно зависит от глубины восстановления надежности при проведении ее ремонта. Существуют граничные значения периодичности замен и глубины восстановления надежности, при которых проведение ремонтов нецелесообразно, так как наработка на отказ аппаратуры в этих случаях становится ниже, чем при отсутствии такого ремонта. Существуют предельные значения глубины восстановления надежности, при которых проведение ремонтов с любой периодичностью снижает наработку на отказ аппаратуры и проведение таких ремонтов нецелесообразно.

Из результатов исследований следует, что для аппаратуры, у которой процессы старения и износа выражены более четко, расширяется диапазон целесообразности проведения ремонтов. Полученные результаты показывают, что в условиях эксплуатации за счет изменения периодичности проведения предупредительных замен и глубины восстановления надежности можно обеспечить требуемое значение средней наработки на отказ аппаратуры.

Ключевые слова: ремонт, замена, периодичность, надежность, глубина восстановления, интенсивность отказов, наработка на отказ.

Введение

В предыдущей статье автора [1] изложена методика для расчета периодичности предупредительных замен аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) с учетом глубины восстановления надежности при ее ремонте в РТУ дистанции. При этом глубину восстановления надежности после ремонта предложено оценивать как разницу между доремонтным и межремонтным ресурсом аппаратуры.

Известно, что проведение предупредительных замен целесообразно только для устройств с постепенными отказами, когда интенсивность отказов со временем эксплуатации монотонно возрастает [2]. Процессы износа и старения, описанные в [3], приводят к постепенным отказам устройств и аппаратуры ЖАТ. Для описания постепенных отказов, как правило, используются распределение Вейбулла и гамма-распределение [4], а также распределение косинуса [5]. Предупредительные замены предотвращают рост интенсивности отказов,

обеспечивая необходимый уровень эксплуатационной надежности аппаратуры ЖАТ.

Представляется целесообразным эффективность предупредительных замен ремонтируемой аппаратуры ЖАТ оценивать по улучшению наиболее наглядных показателей надежности, таких как интенсивность отказов (ИО) и наработка на отказ (ННО).

Цель статьи – провести исследования зависимостей средней интенсивности отказов и средней наработки на отказ ремонтируемой аппаратуры автоматики и телемеханики от периодичности предупредительных замен и глубины восстановления надежности, а также от коэффициента вариации распределений, используемых для описания отказов аппаратуры ЖАТ.

Изложение основного материала

1. Интенсивность отказов аппаратуры, прошедшей ремонт

Так как распределение наработки на отказ при постепенных отказах не подчиняется

© В. А. Володарский, 2019

експоненціальному розподіленню, представляється цілесообразним використовувати середню ІО за некоторое задане время, например, за период предупредительной замены (ПЗ). В [6] рассмотрен случай проведения идеального ремонта, при котором происходит полное восстановление первоначальной надежности. При проведении ПЗ с периодичностью τ интенсивность постепенных отказов $\lambda(t)$, связанных с износом и старением, снижается до нуля (см. рис. 1).

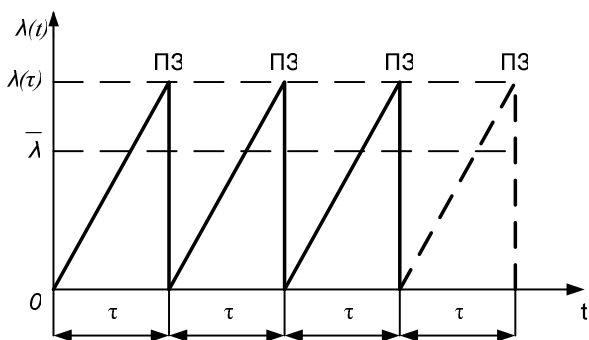


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов при проведении ПЗ

При этом изменяется распределение наработки на отказ, поскольку плавная зависимость ИО от времени эксплуатации t заменяется на пилообразную кривую, с размахом от нуля до $\lambda(\tau)$, а затем снова до нуля.

Среднее значение ИО $\bar{\lambda}$ (см. пунктир на рис. 1) при проведении ПЗ определяется из выражения [6]

$$\bar{\lambda} = \tau^{-1} \int_0^{\tau} \lambda(t) dt = -\ln P(\tau) \tau^{-1}, \quad (1)$$

где $P(\tau)$ – вероятность безотказной работы (ВБР) при наработке τ .

В общем случае для восстановления надежности после проведения n замен отремонтированной аппаратурой (ПР) осуществляется замена новой аппаратурой (ПЗ). Характер изменения интенсивности отказов представлен на рис. 2. После проведения ПР с периодичностью τ и глубиной восстановления надежности a ИО аппаратуры снижается до значения $\lambda(a)$, а после проведения ПЗ с периодичностью τ_p – до нуля. ИО в момент проведения ПР и ПЗ составляет $\lambda(\tau+a)$. Таким образом, кривая интенсивности отказов заменяется на пилообразную с размахом от $\lambda(a)$ до $\lambda(\tau+a)$ и затем до $\lambda(a)$ при проведении ПР и от $\lambda(\tau+a)$ до нуля – при проведении ПЗ. С уменьшением периодичности ПР максимумы пилообразной кривой ИО приближаются к прямой $\lambda(a)$.

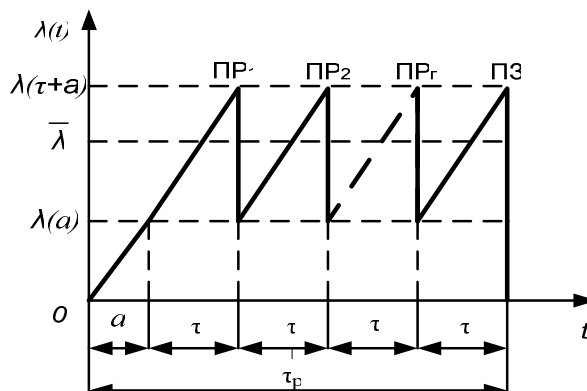


Рис. 2. Изменение интенсивности отказов при проведении ПР и ПЗ

Средняя интенсивность отказов $\bar{\lambda}$, отмеченная на рис. 2 пунктирной линией, на интервале $0-\tau_p$ определяется из выражения

$$\bar{\lambda} = \tau_p^{-1} \int_0^{\tau_p} \lambda(t) dt, \quad (2)$$

$$\text{где } \int_0^{\tau_p} \lambda(t) dt = \int_0^a \lambda(t) dt + (n+1) \int_a^{\tau+a} \lambda(t) dt = n \ln P(a) - (n+1) \ln P(\tau+a);$$

$P(a)$ и $P(\tau+a)$ – ВБР, соответственно, при наработке a и $\tau+a$. Здесь a – глубина восстановления надежности.

Подставив значение $\int_0^{\tau_p} \lambda(t) dt$ в выражение (2) и учитывая, что $\tau_p = a + (n+1)\tau$ (см. рис. 2), получим

$$\bar{\lambda} = [n \ln P(a) - (n+1) \ln P(\tau+a)] / [a + (n+1)\tau], \quad (3)$$

Рассмотрим два частных случая:

при $n=0$, когда проводятся только замены новой аппаратурой и $a=0$, из (3) получим уравнение (1);

при $n \rightarrow \infty$, когда проводятся только замены отремонтированной аппаратурой, после раскрытия неопределенности получим

$$\bar{\lambda} = [\ln P(a) - \ln P(\tau+a)] \tau^{-1}. \quad (4)$$

В случае, когда отказы аппаратуры описываются распределением косинуса, выражение (3) имеет вид

$$\bar{\lambda} = [n \ln \cos a - (n+1) \ln \cos(\tau+a)] / [a + (n+1)\tau], \quad (5)$$

С использованием выражения (5) проведены исследования зависимости средней интенсивности отказов от количества и периодичности ПР и глубины восстановления надежности. Установлено, что с

уменьшением количества ПР до ПЗ значение $\bar{\lambda}$ снижается. При уменьшении параметра a (увеличении глубины восстановления надежности) значение $\bar{\lambda}$ снижается, а при $a=0$ значение $\bar{\lambda}$ определяется только периодичностью ПЗ.

Таким образом, уменьшая периодичность или количество ПР до ПЗ или увеличивая глубину восстановления надежности (путем расширения объема работ по замене или восстановлению составных частей аппаратуры при ее ремонте), можно обеспечить заданное значение средней интенсивности отказов аппаратуры.

2. Нарботка на отказ аппаратуры, прошедшей ремонт

Сначала необходимо предложить выражения для определения средней наработки на отказ при предупредительных заменах отремонтированной аппаратурой с учетом глубины восстановления надежности. Затем исследовать влияние периодичности ПР и глубины восстановления надежности на значения ННО для разных распределений, используемых для описания процессов старения и износа аппаратуры. Средняя наработка на отказ при проведении предупредительных замен новой аппаратурой $T(\tau)$ определяется согласно [2] как

$$T(\tau) = \int_0^T P(t) dt / (1 - P(\tau)), \quad (6)$$

где T – периодичность ПЗ;

$P(t)$ и $P(\tau)$ – ВБР, соответственно, за период времени t и T .

Выражение (6) справедливо для случая, когда полностью восстанавливается надежность аппаратуры. Это означает, что «возраст» аппаратуры после ПЗ как бы «возвращается» в нуль. Вероятность безотказной работы при проведении ПР с периодичностью T и глубиной восстановления надежности α определяется согласно [4] как условная ВБР $P(\tau/\alpha)$ аппаратуры, имеющей «возраст» α , из выражения

$$P(\tau/\alpha) = P(\tau + \alpha) / P(\alpha). \quad (7)$$

Для стареющей аппаратуры при $T > 0$ значение $P(\tau/\alpha)$ убывает по α . Это означает, что чем с меньшей глубиной выполняется ремонт, тем ниже значение ВБР аппаратуры. Подставив в выражение (6) вместо $P(t)$ и $P(\tau)$ значения $P(t/\alpha)$ и $P(\tau/\alpha)$ из (7), получим уравнение для определения ННО аппаратуры при проведении ПР $T(\tau/\alpha)$ вида

$$T(\tau/\alpha) = \int_{\alpha}^{\tau+\alpha} P(t) dt / (P(\alpha) - P(\tau + \alpha)). \quad (8)$$

Если проводятся ПЗ, то из выражения (8) как частный случай при $\alpha = 0$ получим уравнение (6). Для удобства проведения расчетов и анализа полученных результатов приведем уравнение (8) к безразмерному виду

$$T_* = T(\tau/\alpha) / T = \int_{\tau}^{\tau+\tau} P(u) du / (P(\alpha) - P(x + \alpha)), \quad (9)$$

где T_* – относительная (нормализованная) ННО при проведении ПР;

T – ННО аппаратуры, когда ПР не проводятся;

$x = \tau/T$; $\alpha = \alpha/T$; $u = t/T$ – соответственно, периодичность ПР, глубина восстановления надежности и время в единицах ННО.

При $x=0$ из выражения (9) после раскрытия неопределенности получим $T_* = 1/\lambda(\alpha)$. Это означает, что ННО при проведении ПР не может быть увеличена более, чем на величину обратной интенсивности отказов в точке α , оценивающей глубину восстановления надежности аппаратуры. При проведении ПЗ, когда $\alpha = 0$, получим $T_* = 1/\lambda(0)$. Если $\lambda(0) = 0$, то $T_* \rightarrow \infty$. Это означает, что в этом случае при $x \rightarrow 0$ может быть обеспечена практически безотказная работа аппаратуры.

Известно, что предупредительные замены повышают надежность, если аппаратура является стареющим изделием, у которого интенсивность отказов со временем возрастает.

Рассмотрим два предельных случая:

- процессы старения в аппаратуре отсутствуют, что соответствует случаю экспоненциального распределения с коэффициентом вариации $V = 1$. В этом случае, когда $P(u) = \exp(-u)$, из выражения (9) получим $T_* = 1$. Это означает, что ННО не изменяется и проведение предупредительных замен нестареющей аппаратуры нецелесообразно;

- ННО аппаратуры является детерминированной величиной, что соответствует случаю вырожденного распределения с $V = 0$. В этом случае, когда $P(u) = 1$ при $u \leq 1$ и $P(u) = 0$ при $u > 0$, из выражения (9) получим $T_* \rightarrow \infty$. Это означает, что при проведении предупредительных замен с периодичностью $x \leq 1$ обеспечивается абсолютно безотказная работа аппаратуры.

В случае распределения косинуса, когда $P(u) = \cos u$ а $V = 0,375$ [5], выражение (9) имеет вид

$$T_* = (\sin(x + \alpha) - \sin\alpha)(\cos\alpha - \cos(x + \alpha))^{-1}, \quad (10)$$

причем при $x = 0$ после раскрытия неопределенности получим $T_* = ctg\alpha$. При проведении ПЗ, когда $\alpha = 0$, из выражения (10) получим $T_* = \sin x(1 - \cos x)^{-1}$. Зависимости T_* от x , построенные с использованием уравнения (10) при различных значениях α , представлены на рис. 3, на котором горизонтальной пунктирной линией показано значение $T_* = 1$, когда предупредительные замены не проводятся.

Из рисунка 3 видно следующее. Во-первых, наработка на отказ аппаратуры существенно зависит от глубины восстановления надежности. Например, при периодичности ПР $x = 0,2$ и уменьшении глубины восстановления надежности, то есть при увеличении α от нуля до 0,4 относительная ННО снижается с 9,97 до 1,83, то есть в 5,5 раза. Во-вторых, при $\alpha > 0$, начиная с некоторого значения периодичности ПР, которое назовем граничным $x_{г}$ (см. вертикальные пунктирные линии на рис. 3), значение T_* становится менее единицы. Это означает, что проведение ПР ухудшает надежность аппаратуры. Выражение для определения $x_{г}$ найдем из уравнения (10) при условии $T_* = 1$ как $x_{г} = \pi/2 - 2\alpha$.

Аналогично при заданном значении x определяется граничное значение глубины восстановления аппаратуры $\alpha_{г}$ как

$$\alpha_{г} = \pi/4 - x/2. \quad (11)$$

Предельное значение глубины восстановления надежности α_n , когда при любом значении периодичности ПР $T_* \leq 1$, найдем из условия $\lambda(\alpha_n) = 1$ как $\alpha_n = arctg1 = \pi/4 \approx 0.786$.

На рис. 4 представлена построенная с использованием уравнения (11) зависимость $\alpha_{г}$ от x (см. прямая линия 1). Причем, если точка пересечения значения $\alpha_{г}$ и x лежит выше прямой 1, то проведение предупредительных замен при такой периодичности и глубине восстановления надежности аппаратуры нецелесообразно. В этом случае необходимо или уменьшить периодичность ПР, или увеличить глубину восстановления надежности (путем расширения объема работ по замене или восстановлению составных частей аппаратуры) до таких значений, чтобы точка пересечения $\alpha_{г}$ и x лежала ниже прямой 1.

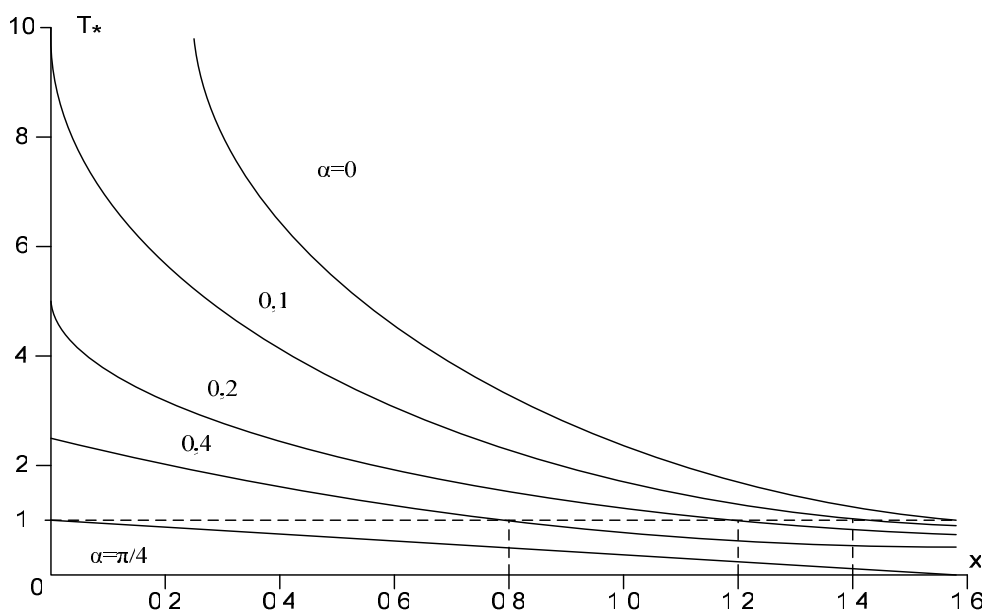


Рис. 3. Зависимости наработки на отказ при распределении косинуса от периодичности предупредительных замен и глубины восстановления надежности

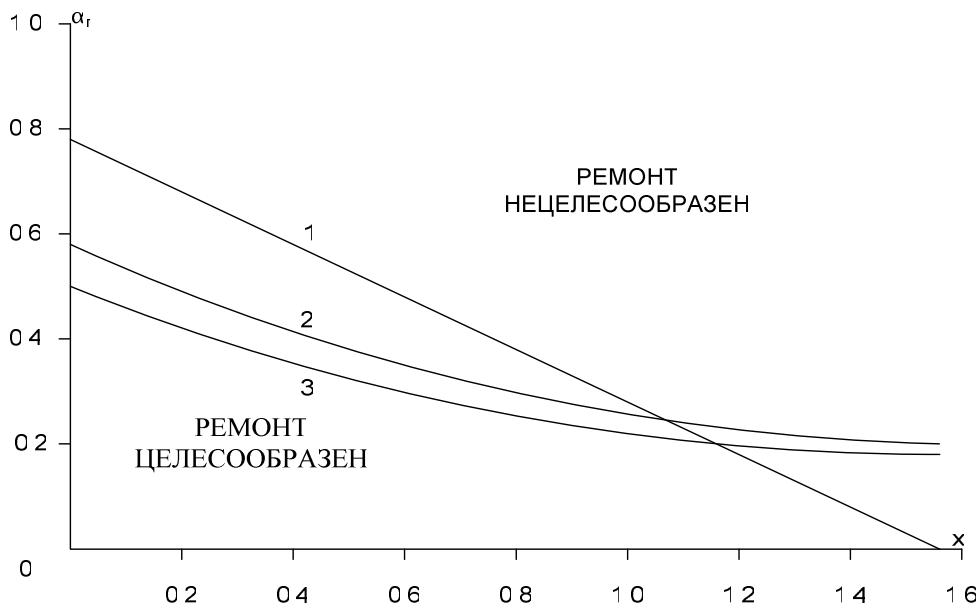


Рис. 4. Зависимости граничных значений глубины восстановления надежности от периодичности предупредительных замен

В случае гамма-распределения, когда $P(u) = \exp(-mu) \sum_0^{m-1} (mu)^i / i!$ [4], при $m = 2 (V = 707)$ из выражения (9) получим

$$T_* = \frac{(1+\alpha) \exp(-2\alpha) - (1+x+\alpha) \exp(-2(x+\alpha))}{(1+2\alpha) \exp(-2\alpha) - (1+2x+2\alpha) \exp(-2(x+\alpha))} \quad (12)$$

Уравнение для определения α_r найдем из выражения (12) при условии $T_* = 1$ как

$$\alpha_r = x \exp(-2x) / (1 - \exp(-2x)). \quad (13)$$

Учитывая, что при $m = 2\lambda(u) = 4u / (1 + 2u)$, предельное значение глубины восстановления надежности найдем из условия $\lambda(\alpha_n) = 1$ как $\alpha_n = 0,5$. Зависимость α_r от x , построенная с использованием уравнения (13), представлена на рис. 4 (кривая 3).

В случае гамма-распределения при $m = 4 (V = 0,5)$ граничные значения глубины восстановления надежности определены как абсциссы точек пересечения кривых $T_*(x)$, построенные с использованием выражения (9), с прямой $T_* = 1$. В этом случае предельное значение глубины восстановления надежности найдем численным методом как $\alpha_n \approx 0,567$. Зависимость α_r от x представлена на рис. 4 (кривая 2). Из сравнения кривых 2 и 3, представленных на рис. 4, видно, что с уменьшением коэффициента вариации граничные значения глубины восстановления надежности

увеличиваются. Это означает, что для аппаратуры, у которой процессы старения и износа выражены более четко, расширяется диапазон целесообразности проведения ее ремонта.

Выводы

1. Для определения средней интенсивности отказов и средней наработки на отказ аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики целесообразно использовать предложенные выражения, учитывающие глубину восстановления надежности при проведении ее ремонта.

2. Значение средней интенсивности отказов с уменьшением периодичности и количества замен отремонтированной аппаратурой до замены новой аппаратурой снижается, а с уменьшением глубины восстановления надежности аппаратуры возрастает.

3. Варьируя глубину восстановления надежности или периодичность и количество замен отремонтированной аппаратурой до замены новой аппаратурой, можно обеспечить заданное значение средней интенсивности отказов аппаратуры.

4. Нарботка на отказ аппаратуры существенно зависит от глубины восстановления надежности при проведении ее ремонта. Существуют граничные значения периодичности замен и глубины восстановления надежности, при которых проведение ремонта нецелесообразно, так как средняя наработка на отказ аппаратуры в этих случаях становится ниже, чем при отсутствии такого ремонта.

5. Существуют предельные значения глубины восстановления надежности, при которых проведение ремонта с любой периодичностью снижает среднюю

наработку на отказ аппаратуры и проведение такого ремонта нецелесообразно.

6. Из результатов исследований следует, что для аппаратуры, у которой процессы старения и износа выражены более четко, расширяется диапазон целесообразности проведения ее ремонта.

7. Полученные результаты показывают, что в условиях эксплуатации за счет изменения периодичности проведения предупредительных замен и глубины восстановления надежности можно обеспечить требуемое значение средней наработки на отказ аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики.

Список использованных источников

1. Володарский, В. А. Оптимизация технического содержания аппаратуры автоматики и телемеханики [Текст] / В. А. Володарский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2016. – № 3. – С. 64–68.
2. Барлоу, Р. Математическая теория надежности [Текст] / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
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. Барлоу, Р. Статическая теория надежности и испытания на безотказность [Текст] / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
5. Володарский, В. А. О нетрадиционных распределениях для описания отказов технических средств [Текст] / В. А. Володарский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2014. – № 5. – С. 33-39.
6. Эндрени, Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах [Текст] / Дж. Эндрени. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 435 с.

Volodarsky V. A. Investigation of the reliability of the repaired equipment of automatics and telemechanics.

Abstract. The results of studies of the dependence of the average failure rate and mean time between failures of the repaired equipment of automation and telemechanics on the frequency of preventive replacements and the depth of reliability restoration, as well as the coefficient of variation of distributions used to describe equipment failures.

It is established that the value of the average failure rate with a decrease in the frequency and number of

replacements of repaired equipment before replacement with new equipment decreases, and with a decrease in the depth of restoration of the reliability of the equipment increases. By varying the depth of reliability restoration or the frequency and number of replacements of the repaired equipment before replacement with new equipment, it is possible to provide a set value of the average failure rate of automation and telemechanics equipment.

MTBF of the equipment significantly depends on the depth of recovery of reliability when conducting the repair. There are the boundary values of the frequency of replacements and the recovery depth of reliability, in which repair is impractical, as the time to failure of equipment in these cases is lower than in the absence of such repairs. There are limits to the depth of reliability restoration, in which repairs at any frequency reduces the time between failures of equipment and carrying out such repairs is impractical.

From the results of research it follows that for the equipment, in which the aging and wear processes are expressed more clearly, the range of expediency of repairs is expanding. The obtained results show that in operating conditions due to changes in the frequency of preventive replacements and the depth of reliability restoration it is possible to provide the required value of the mean time between failures of the equipment.

Keywords: repair, replacement, frequency, reliability, recovery depth, failure rate, time to failure.

Надійшла 28.12.2018 р.

Volodarsky V. A., PhD, senior researcher, associate Professor, Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru