



Володарский В. А., Орленко А.И.

О НАДЕЖНОСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА, ПРОШЕДШЕГО РЕМОНТ

Предложены выражения для определения средней интенсивности отказов ремонтируемого подвижного состава. Изложены результаты исследований зависимости интенсивности отказов от глубины восстановления ресурса, числа и периодичности ремонтов до замены подвижного состава.

Ключевые слова: интенсивность отказов, ресурс, глубина восстановления, ремонт, замена, периодичность.

1. Состояние вопроса

В процессе эксплуатации подвижного состава (ПС) с целью обеспечения его надежности проводится техническое обслуживание, текущие и капитальные ремонты. Известно, что при ремонте ПС обычно возвращается лишь часть исходных надежностных свойств.

При эксплуатации ПС неизбежны его отказы по различным причинам, которые можно классифицировать в зависимости от сложности их устранения. Важное технико-экономическое значение при этом имеет выбор места и метода устранения отказа. По этим признакам целесообразно все отказы разделить на две группы: отказы работоспособности и ресурсные отказы. Для устранения отказов первой группы не требуются трудоемкие работы, а работоспособность ПС восстанавливают заменой, ремонтом или регулировкой неисправных элементов в объеме технического обслуживания (ТО) или текущего ремонта (ТР). При этом остаточный ресурс ПС остается прежним. Преимущество этого способа – возможность полного использования ресурса большинства элементов ПС.

Под ресурсным отказом будем понимать такое событие, которое характеризуется либо физическим выходом ПС из строя как целого, либо такими отказами его элементов, при которых целесообразно восстановление до определенного уровня ресурса всего ПС. Для устранения таких отказов необходимо выполнить трудоемкие разборные, ремонтные, сборные, регулировочные, обкаточные и другие работы. Такой способ устранения отказа более сложен, и для его проведения требуются специальные производственные условия ремонта. Преимущество этого способа: восстановление установленного нормативно-технической документацией ресурса и повышение, таким образом, надежности ПС. Ресурсные отказы устраняются проведением капитального ремонта (КР) или неплановой заменой. В первом случае происходит частичное, а во втором случае – полное восстановление ресурса ПС.

Все ремонтно-обслуживающие воздействия в процессе эксплуатации ПС можно классифицировать по трем признакам: по моменту проведения работы – плановая или неплановая; по характеру работы – предупредительная или аварийная; по глубине восстановления ресурса – никакого обновления не производится (выполняется ТО или ТР),

частичное восстановление (выполняется КР) и полное восстановление (выполняется замена).

Из-за процессов старения и износа интенсивность постепенных отказов ПС со временем эксплуатации возрастает. Для описания постепенных отказов в теории надежности используются распределения с возрастающей функцией интенсивности, например, Вейбулла с параметром формы более единицы. Предупредительные ремонты предотвращают рост интенсивности отказов, обеспечивая необходимый уровень надежности ПС. Поэтому для оценки надежности ПС, прошедшего ремонт, целесообразно использовать наиболее наглядный показатель – интенсивность отказов.

Цель статьи – предложить выражения для определения средней интенсивности отказов, учитывающие глубину восстановления ресурса ремонтируемого ПС, и провести исследования зависимостей интенсивности отказов от глубины восстановления ресурса, от числа и периодичности ремонтов до замены подвижного состава.

2. Учет глубины восстановления ресурса

Для учета глубины восстановления ресурса при предупредительном и аварийном ремонте ПС предлагается использовать согласно [1] параметр a – как «возраст» ПС после проведения капитального ремонта. Изменение интенсивности ресурсных отказов при проведении капитальных ремонтов и замены ПС представлено на рисунке 1, где

$T_{др}$, $T_{мр}$ и T_p – соответственно доремонтный, межремонтный и полный ресурс ПС. Полным обновлением назовем такое, при котором ПС как бы «возвращается» в состояние, которое он имел в момент начала эксплуатации (см. точка 0 на рис. 1), когда интенсивность ресурсных отказов равна нулю. Это соответствует тому, что проведена предупредительная замена. При проведении ремонта параметр a предлагается оценивать как $a = T_{др} - T_{мр}$ (см. рис. 1). В дальнейшем при разработке математических моделей оптимизации предупредительных ремонтов для оценки глубины восстановления ресурса целесообразно использовать безразмерный параметр

$\alpha = a/T_{др}$. Если $\alpha = 0$, то это означает, что проведена замена ПС. Если проводится КР, например, через время τ то «возраст» ПС уменьшается от τ до $\alpha\tau$.

3. Интенсивность отказов ПС, прошедшего ремонт

Так как распределение наработки на отказ при постепенных отказах не подчиняется экспоненциальному закону, представляется целесообразным использовать среднюю интенсивность отказов (ИО) за некоторое заданное время, например, за межремонтный период или период до замены. Если принять полученное среднее значение ИО практически постоянным, то можно использовать допущение об экспоненциальном распределении наработки на отказ ремонтируемых устройств.

В [2] рассмотрен случай проведения идеального ремонта, при котором происходит полное восстановление первоначальной надежности, которое возможно только при замене устройства на новое. При проведении предупредительной замены (ПЗ) с периодичностью τ интенсивность отказов $\lambda(t)$, связанная с износом и старением, снижается до нуля (см. рисунок 2.). При этом изменяется распределение наработки на отказ, поскольку кривая зависимости ИО от времени эксплуатации заменяется на пилообразную кривую с размахом от нуля до $\lambda(\tau)$, а затем снова до нуля. Среднее значение интенсивности отказов $\bar{\lambda}$ (см. пунктирная линия на рис. 2) при проведении ПЗ определяется из выражения [2]

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

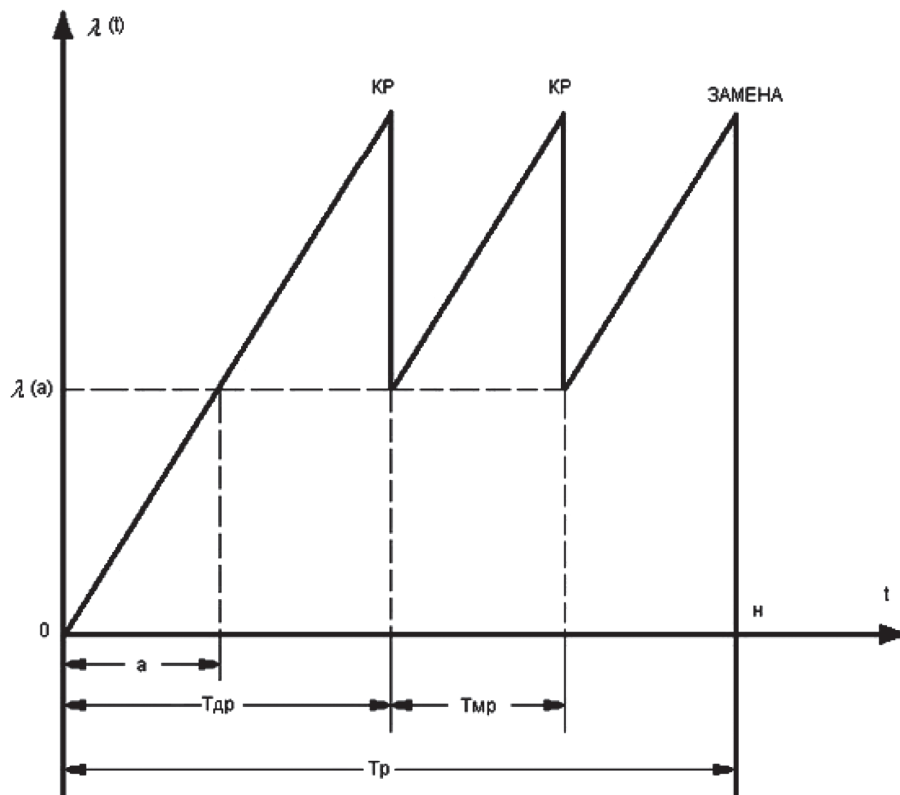


Рис. 1. Изменение интенсивности ресурсных отказов при проведении капитальных ремонтов

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

На практике, как правило, устройства не заменяются, а ремонтируются. При этом не происходит полного восстановления надежности. Для учета глубины восстановления ресурса предлагается использовать параметр $a > 0$, означающий “возраст” ПС после проведения ремонта [1]. При этом значение параметра a определяется объемом работ по замене или восстановлению составных частей ПС при проведении ремонта.

В общем случае для восстановления ресурса после проведения n предупредительных ремонтов (ПР) осуществляется замена этого ПС новым. Характер изменения интенсивности отказов представлен на рисунке 3. После проведения ПР с периодичностью τ ИО 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 функции ИО приближаются к прямой $\lambda(a)$.

Средняя интенсивность отказов $\bar{\lambda}$, отмеченная на рис. 3 пунктирной линией, на интервале $0 - \tau_p$ определяется из выражения

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

Где

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

Подставив значение $\int_0^{\tau_p} \lambda(t) dt$ в выражение (2), и, учитывая, что

$$\tau_p = a + (n+1)\tau \text{ (см. рис.3), получим}$$

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

Рассмотрим два частных случая:

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

при $n \rightarrow \infty$, когда проводятся только ремонты после раскрытия неопределенности, получим $\bar{\lambda} = [\ln P(a) - \ln P(\tau+a)] \tau^{-1}$.

Рассмотрим случай, когда отказы ПС описываются распределением Вейбулла. Тогда выражение (3) будет иметь вид

$$\bar{\lambda} = [(n+1)((\tau+a) k_b/T)^b - n(ak_b/T)^b] [a + (n+1)\tau]^{-1}, \quad (4)$$

где T – наработка на отказ;

b – параметр формы распределения Вейбулла;

$K_b = \Gamma(1+1/b)$, здесь Γ – гамма-функция.

С использованием выражения (4) были проведены исследования зависимости средней интенсивности отказов от количества и периодичности ПР, глубины

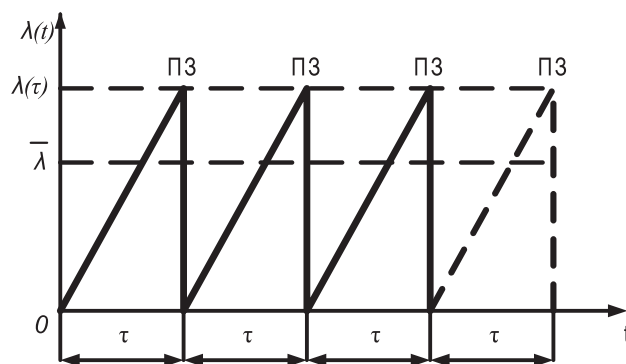


Рис. 2. Изменение интенсивности отказов при заменах

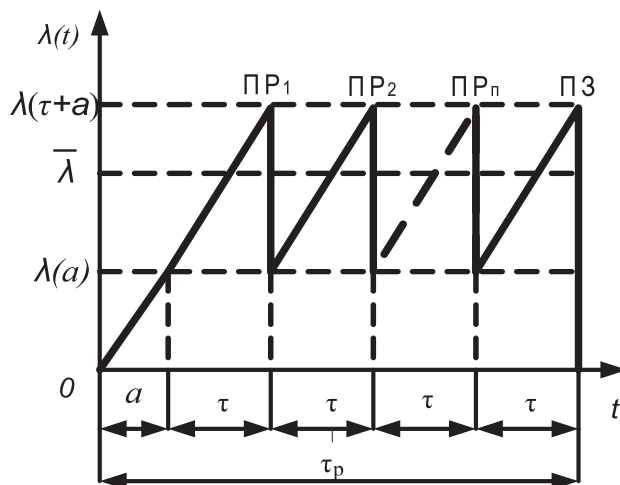


Рис. 3. Изменение интенсивности отказов при ремонтах и замене

восстановления ресурса и параметра формы распределения Вейбулла. Ниже приведены примеры результатов расчетов с представлением параметров T , τ и $\bar{\lambda}$ в безразмерном виде.

Установлено, что с уменьшением количества ПР до замены ПС значение $\bar{\lambda}$ снижается. Например, в случае распределения Вейбулла при $b=4$, $T=1000$, $a=50$ и $\tau=200$ имеем: при $n \rightarrow \infty$ $\bar{\lambda} = 0,131 \times 10^{-4}$; при $n=3$ $\bar{\lambda} = 0,124 \times 10^{-4}$; при $n=0$ $\bar{\lambda} = 0,054 \times 10^{-4}$.

При уменьшении периодичности ПР значение снижается. Например, в случае распределения Вейбулла при $b=4$, $T=1000$, $a=50$, $n=3$, получаем: при $\tau=200$ $\bar{\lambda} = 0,124 \times 10^{-4}$, а при $\tau=100$ $\bar{\lambda} = 0,030 \times 10^{-4} \text{ 1/час}$.

При уменьшении параметра a (увеличении глубины восстановления ресурса) значение $\bar{\lambda}$ снижается, а при $a=0$ значение $\bar{\lambda}$ определяется только периодичностью ПЗ. Например, в случае распределения Вейбулла при $b=2$, $T=1000$, $\tau=200$, $n=3$ имеем: при $a=100$ $\bar{\lambda} = 0,288 \times 10^{-3}$, а при $a=50$ $\bar{\lambda} = 0,224 \times 10^{-3}$.

Таким образом, уменьшая периодичность или количество ПР до замены ПС или увеличивая глубину восстановления ресурса (путем расширения объема работ по замене или восстановлению составных частей ПС при проведении ПР), можно обеспечить практически любое заданное значение средней интенсивности отказов подвижного состава.

С уменьшением коэффициента вариации V (с ростом параметра b) значение $\bar{\lambda}$ снижается. Например, в случае распределения Вейбулла при $T=1000$, $a=50$, $\tau=200$ час, $n=1$ имеем: при $b=2-\bar{\lambda} = 0,214 \times 10^{-3}$, а при $b=4-\bar{\lambda} = 0,117 \times 10^{-3}$. Это означает, что для ПС с явно выраженными процессами старения и износа повышается эффективность проведения предупредительного ремонта подвижного состава.

Выводы

1. Для определения средней интенсивности постепенных отказов, связанных с износом и старением, целесообразно использовать предложенные выражения, учитывающие глубину восстановления ресурса при проведении ремонта подвижного состава.

2. Из результатов исследований следует, что для подвижного состава, у которого процессы старения и износа выражены более четко, проведение предупредительного ремонта более целесообразно.

3. Значение средней интенсивности отказов с уменьшением периодичности и количества ремонтов до замены подвижного состава снижается, а с уменьшением глубины восстановления ресурса – возрастает.

4. Варьируя глубину восстановления ресурса или периодичность и количество предупредительных ремонтов за срок службы, можно обеспечить заданное значение средней интенсивности отказов подвижного состава.

Литература

1. **Володарский В.А.** К вопросу оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств // Надежность. – 2011. – С. 49-59.

2. **Эндрени Дж.** Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 435 с.