

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ СПЕЦИАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Локтев А.А., Королев В.В., Шишкина И.В.
Российский университет транспорта, Москва

Ключевые слова: путевые машины, ремонт специальной железнодорожной техники, ресурс специального подвижного состава, землеройная техника, безотказная работа, показатель надежности, экспоненциальный закон распределения.

Аннотация. В статье подчеркивается, что с ростом объемов и сложности работ возрастает роль надежности техники как фактора, определяющего производственный потенциал и эффективность железнодорожной системы. Анализируются методы восстановления производственного потенциала, акцентируя внимание на ремонте как ключевом элементе в условиях ограниченных ресурсов. Представлены основные показатели надежности, такие как время безотказной работы, распределение отказов во времени, интенсивность отказов, математическое ожидание интервала между отказами и дисперсия. Особое внимание уделено применению экспоненциального закона распределения для описания надежности элементов путевых железнодорожных машин. Приводится пример расчета вероятности отказа детали путевой землеройной железнодорожной машины, демонстрирующий практическое применение рассмотренных теоретических положений.

QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF THE RELIABILITY OF A SPECIAL RAILWAY ROLLING STOCK

Loktev A.A., Korolev V.V., Shishkina I.V.
Russian University of Transport, Moscow

Keywords: track machines, repair of special railway equipment, resource of special rolling stock, earthmoving equipment, trouble-free operation, reliability indicator, exponential distribution law.

Abstract. The article emphasizes that as the volume and complexity of work increases, the role of reliability of machinery increases as a factor determining the production potential and efficiency of the railway system. The methods of restoring production potential are analyzed, focusing on repair as a key element in conditions of limited resources. The main reliability indicators are presented, such as uptime, time distribution of failures, failure rate, mathematical expectation of the interval between failures and variance. Special attention is paid to the application of the exponential distribution law to describe the reliability of elements of track railway vehicles. An example of calculating the probability of failure of a part of a track-moving railway machine is given, demonstrating the practical application of the theoretical provisions considered.

С ускоренным техническим и технологическим развитием специального наземного транспорта стала возрастать необходимость в обслуживании специализированного подвижного состава. За последнее столетие численность такого транспорта значительно увеличилась, что повысило эффективность и производительность работ по строительству, реконструкции и текущему обслуживанию железных дорог. Сейчас процесс строительства и ремонта железных дорог представляет собой слаженную работу машин, выполняющих операции по обработке, формоизменению и перемещению материалов. Принятие решений о строительстве или ремонте железных дорог сосредотачивается на

анализе производственного потенциала, в первую очередь, на наличии специального подвижного состава.

Процесс строительства и обслуживания железных дорог – это не только созидание, но одновременно и процесс расхода запасенной заранее «энергии», т.е. производственного потенциала. Этот расход проявляется в том, что техническое оборудование изнашивается под воздействием эксплуатации и выходит из строя, уменьшая общий объем производственных ресурсов.

Ремонт позволяет возвращать изношенную и поврежденную технику в строй. Это значит, что ремонт является процессом, в результате которого восстанавливается производственный потенциал [1].

Восстановление производственного потенциала специализированных железнодорожных наземных транспортных средств может осуществляться не только путем ремонта, но и путем замены устаревших машин новыми. Однако эффективность этих методов восстановления неодинакова. Ремонт приобретает особую важность в периоды кризиса, когда время становится определяющим фактором. Исторический опыт прошлого века показывает, что благодаря ремонту можно значительно продлить срок эксплуатации наземных транспортных средств по сравнению с эксплуатацией без проведения ремонта.

Ремонт не только увеличивает срок службы, но также экономит рабочую силу и оптимизирует использование предыдущего труда. Исследования показали, что из каждых 100 выбывающих из строя единиц наземных транспортных средств в среднем 70 требуют для своего восстановления в 20 раз меньше трудовых затрат, чем изготовление этого же количества вновь.

Ремонт специальной железнодорожной техники приносит выгоду, однако сопряжен с расходом ресурсов. Для восстановления путевой машины требуются квалифицированные специалисты, материалы и время. С увеличением числа и сложности техники расширяется область ремонта, что увеличивает как относительные, так и абсолютные затраты на труд и время. Повышаются требования к качеству ремонта и его срокам выполнения [2].

В современных условиях ремонт техники стал ключевым элементом быстрого восстановления производственного потенциала и внутренним резервом для повышения общей эффективности производства. Ремонт осуществляется в рамках системы «ресурсы-процесс – продукция», что позволяет при ограниченных ресурсах изменять процессы для увеличения или уменьшения производства. Таким образом, система ремонта способствует развитию производственного потенциала и обеспечивает его непрерывную работу.

Для максимизации производительности при ограниченных ресурсах необходимо учитывать функцию обслуживания и ремонта, а также факторы, влияющие на их эффективность. Ремонт и обслуживание наземного транспорта играют ключевую роль в управлении ресурсами и процессами, определяя боеспособность и общую эффективность железнодорожной системы в целом.

Различные причинные факторы могут изменяться случайным образом и оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на результативность ремонта техники и общую эффективность процесса. Современное развитие этой теории отмечается новыми достижениями. Так, для анализа изучаемых явлений и

событий широко используются математические модели, что существенно улучшает результативность научных исследований в области теории старения и надежности машин. Применение системного метода и экономико-математических моделей при анализе и синтезе систем ремонта и ремонтных органов позволяет укрепить научную основу проектирования процессов ремонта.

Для оценки надежности машины применяется вероятностная мера, которая определяет вероятность безотказной работы в определенных условиях эксплуатации и на заданную продолжительность работы. Например, надежность путевой железнодорожной машины можно рассматривать как вероятность отсутствия отказов в течение определенного периода времени [3].

Для более точной оценки надежности, разработки профилактических мер и изучения ремонтпригодности путевой железнодорожной машины используются дополнительные характеристики, такие как время безотказной работы, распределение отказов во времени, интенсивность отказов и другие.

Время безотказной работы путевой железнодорожной машины между двумя устранимыми отказами является непрерывной случайной величиной. Для оценки этой характеристики используется среднее значение пробега до отказа [4, 5].

Численное значение меры надежности элемента (машины) определяется с помощью функции распределения вероятностей:

$$P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(t)dt, \quad (1)$$

где $P(T \geq t)$ – вероятность события, состоящего в том, что элемент (путевая железнодорожная машина) отработает безотказно более t единиц времени; $f(t)$ – функция плотности распределения интервала времени безотказного функционирования элемента в течение t единиц времени.

При исследовании и решении задач, связанных с проектированием систем ремонта, расчетом ресурсов, необходимых для ремонта, исходной переменной служит показатель ненадежности, которая оценивается вероятностью события, состоящего в том, что отказ в элементе наступит на интервале $[0, t]$. Значение указанной вероятности определяется из соотношений:

$$P(T \geq t) + P(0 \leq T < t) = 1, \quad (2)$$

где $P(0 \leq T < t)$ – означает вероятность события, состоящего в том, что T – срок службы элемента до отказа будет менее t .

Пользуясь выражением (1), можно определить значение ненадежности единичного элемента по формуле:

$$P(0 \leq T < t) = \int_0^t f(t)dt. \quad (3)$$

Функция $f(t)$ есть не что иное, как плотность распределения вероятностей времени работы техники до отказа, численно равная взятой с обратным знаком производной от вероятности $P(T \geq t)$:

$$f(t) = -\frac{dP(T \geq t)}{dt} = \frac{dP(0 \leq T < t)}{dt}. \quad (4)$$

Дополнительными числовыми характеристиками надежности восстанавливаемой путевой железнодорожной машины являются математическое ожидание (также известное как среднее значение) интервала между отказами и дисперсия, которая отражает разброс значений интервала относительно его среднего значения. Вместе с функцией распределения и плотностью распределения вероятностей безотказной работы, эти характеристики играют важную роль в обеспечении надежности оборудования [6].

Статистическое среднее наработки до отказа элемента $\bar{m}$ определяется по формуле:

$$\bar{m} = \frac{1}{N} (m_1 + m_2 + \dots + m_N) = \frac{\sum m_i n_i}{n_i}, \quad (5)$$

где m_i – зафиксированное время безотказной работы элементов; N – общее число элементов, подвергавшихся наблюдению, равное $n_1 + n_2 + \dots + n_k = N$; n_i – число элементов с временем безотказной работы, равным m_i ; $i = 1, 2, \dots, k$ – номера, присвоенные разрядам значений случайной величины, например:

$$N_1 - 0 \leq m_1 < 10; N_2 - 10 \leq m_2 < 20; N_3 - 20 \leq m_3 < 30 \text{ и т.д.}$$

Математическое ожидание наработки между двумя отказами ремонтируемой (и наработки до отказа перемонтируемой) машины находят, пользуясь выражением:

$$\bar{m} = \sum_i^b m_i f(t_i), \quad (6)$$

где $f(t_i)$ – функция плотности.

Дисперсия интервала безотказной работы представляет собой математическое ожидание квадрата отклонений величины интервала от его среднего значения.

Численное значение дисперсии подсчитывается по формуле:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^b (m_i - \bar{m})^2 f(t_i). \quad (7)$$

Интенсивность отказов представляет собой отношение числа отказавших в единицу времени элементов к среднему числу элементов, исправно работавших на данном отрезке времени. Статистическое значение интенсивности отказов $\lambda(t)$ равно:

$$\lambda(t) = \frac{n_{om}(t)}{N_{cp} \Delta t}, \quad (8)$$

где $n_{om}(t)$ – число отказавших элементов в единичном t -м интервале времени; Δt – единичный интервал времени; N_{cp} – среднее число исправно работавших элементов.

Исследования, проведенные по интервалам безотказной работы и интенсивности отказов элементов путевых железнодорожных машин, показали, что для математического описания надежности подходят лишь некоторые функции распределения вероятностей, соответствующие требованиям инженерной практики. В частности, касательно деталей наземных железнодорожных транспортных средств и путевых железнодорожных машин, использование функций нормального и экспоненциального законов распределения вероятностей является наиболее эффективным [7, 8].

При использовании экспоненциального закона распределения вероятность появления отказа за время t определяется по формуле:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (9)$$

а плотность распределения вероятностей отказов $f(t)$:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (10)$$

где λ – среднее значение числа отказов, происходящих в единицу времени.

Среднее время функционирования элемента до появления отказа в этом случае составит:

$$\bar{m} = \frac{1}{\lambda}. \quad (11)$$

Экспоненциальный закон широко используется в теории надежности. Это обусловлено тем, что он прост и удобен для применения и вместе с этим обеспечивает точность, согласующуюся с точностью статистик, используемых в расчетах.

Задачи, возникающие в теории надежности для экспоненциальных законов распределения, обладают значительными преимуществами по сравнению с другими законами. Формулы в теории надежности железнодорожных путевых машин и теории систем обслуживания становятся гораздо более простыми при использовании экспоненциального закона. Эти преимущества обусловлены тем, что данный закон распределения не сохраняет информацию о прошлом состоянии системы: вероятность отказа машины в определенный момент времени зависит только от продолжительности этого интервала, а не от предшествующей работы. Иными словами, будущее поведение машины, если она исправна в данный момент, не зависит от ее прошлой работы.

В качестве примера был произведен расчет детали путевой землеройной железнодорожной машины, которая характеризуется параметрами: $m = 2$ месяца, $\sigma = 1,4$ месяца. Землеройная машина останавливается, как только откажет одна из деталей. Требовалось определить вероятность того, что машина отработает безотказно $t = 1, 2$ и 3 месяца. Пользуясь выражением (1), находим $P(t > 1) = 0,76; P(t > 2) = 0,50; P(t > 3) = 0,24$. Для этих же деталей определяем плотность вероятности отказа на интервале $t = 1$ месяц и интенсивность отказов для этого же промежутка.

Плотность вероятности отказа составит:

$$\begin{aligned} f(t=1) &= \frac{1}{\sigma} \left(\frac{t - \bar{m}}{\sigma} \right) = \frac{1}{1,4} \varphi_0 \left(\frac{1-2}{1,4} \right) = \frac{1}{1,4} \varphi_0(-0,715) = \frac{1}{1,4} \varphi_0(-0,715) = \\ &= \frac{1}{1,4} \varphi_0(0,715) = \frac{1}{1,4} 0,309 = 0,221; \end{aligned}$$

интенсивность отказов $\lambda(t)$ деталей на интервале $t = 1$ будет равна:

$$\lambda(t) = \frac{1}{\sigma} f_1(u) = \frac{1}{1,4} f_1 \left(\frac{2-1}{1,4} \right) = \frac{1}{1,4} 0,405 = 0,29 \text{ 1/месяц.}$$

Для наглядного сравнения различий между законами нормального и экспоненциального распределений интервала времени безотказной работы элементов на рисунке 1 представлены графики: 4 – функции и 3 – плотности

нормального распределения, построенные для рассматриваемого примера. Из данных графиков видно значительное расхождение между значениями функций нормального и экспоненциального распределений.

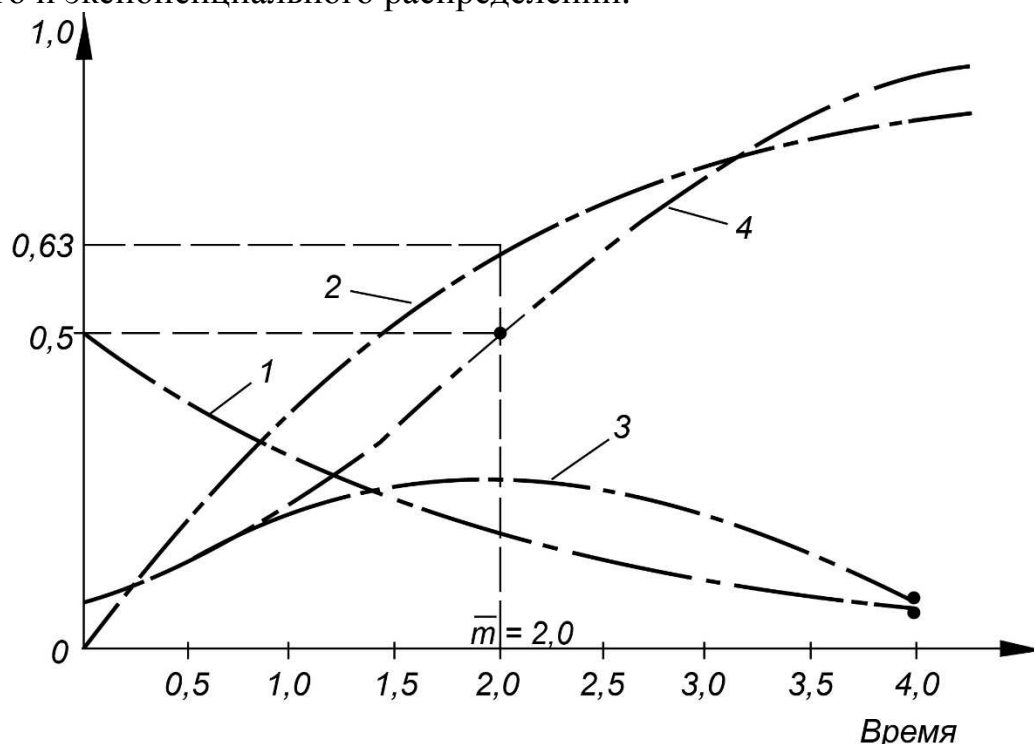


Рис. 1. Графики экспоненциального и нормального распределения: 1 и 2 – плотность и функция показательного распределения, 3 и 4 – плотность и функция нормального распределения

При оценке возможности применения конкретного закона распределения в ответственных случаях важно использовать количественные меры. В некоторых ситуациях случайные величины не могут быть адекватно описаны нормальным распределением. Поэтому необходимо проводить анализ и рассматривать другие законы, такие как распределение Вейбулла, распределение Релея, гамма-распределение и другие.

В заключение, ремонт выступает не только как средство восстановления работоспособности техники, но и как ключевой элемент поддержания и увеличения производственных мощностей, особенно в периоды экономических вызовов и ограниченности ресурсов.

Важность учета надежности и долговечности элементов железнодорожного состава, а также применения математических моделей и статистических методов для анализа отказов, становится неотъемлемой частью стратегии управления ремонтными работами. Использование таких инструментов позволяет прогнозировать поведение техники, оптимизировать сроки и качество ремонта, а также разрабатывать профилактические меры для предотвращения отказов.

Применение экспоненциального закона распределения, как одного из наиболее эффективных методов, предоставляет возможность упростить расчеты и повысить точность оценок надежности железнодорожного оборудования. Это, в свою очередь, способствует более эффективному планированию и управлению ремонтными ресурсами, снижению затрат и увеличению общей производительности железнодорожной системы.

Таким образом, интегрированный подход к управлению ремонтом, основанный на глубоком анализе надежности техники, использовании современных математических моделей и статистических данных, является необходимым условием для обеспечения стабильной и эффективной работы специального железнодорожного транспорта в современных условиях. Это позволяет не только поддерживать существующий производственный потенциал, но и развивать его, обеспечивая устойчивый рост и конкурентоспособность железнодорожной отрасли.

Список литературы

1. Локтев А.А., Королев В.В., Шишкина И.В. Проблемы путевых машин на железнодорожном транспорте // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2024. – № 17. – С. 21-29. – DOI: 10.26160/2309-8864-2024-17-21-29.
2. Кравникова А.П. Осуществление деятельности предприятия по техническому обслуживанию и ремонту специального подвижного состава: Учебное пособие. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 104 с.
3. Фокин С.В., Бунаков П.Ю. Надежность работы железнодорожных путевых машин: проблемы и пути решения // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2014. – Т. 4, №1. – С. 57-60.
4. Юсупов Т.Р., Шайдуллин Р.Р., Елизарьев А.Н. Статистический анализ причин аварийности на железнодорожном транспорте // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2015. – № 12-1. – С. 189-192.
5. Шишкина И.В. Статистика и контроль качества стрелочной продукции // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 9. – С. 32-33.
6. Гадолина И.В., Карелина М.Ю., Петрова И.М. Экспериментально-расчетный метод оценки долговечности узлов машин при многоцикловом нагружении // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2013. – № 1. – С. 14-18.
7. Власкин В.В. Особенности изготовления ремонтных деталей // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2018. – № 6. – С. 128-130.
8. Гусяков В.В., Давыдов В.М., Якуба Д.Д. Восстановление сложнопрофильных деталей на основе аддитивных технологий // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2019. – № 7. – С. 151-156. – DOI: 10.26160/2309-8864-2019-7-151-156.

Сведения об авторах:

Локтев Алексей Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство»;

Королев Вадим Вадимович – к.т.н., доцент, заведующий лабораторией «Верхнее строение железнодорожного пути и путевое хозяйство» кафедры «Транспортное строительство»;

Шишкина Ирина Викторовна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Транспортное строительство».