

УДК [002:004]:629.4.014.2

А.А. Воробьев, А.В. Горский, В.А. Козырев

## Информационные ресурсы для методики оценки показателей надежности тягового подвижного состава

*Для получения достоверных оценок показателей безотказности и долговечности оборудования в процессе эксплуатации необходимо систематизировать большой объем информации о межремонтных периодах тягового подвижного состава (ТПС) и наработок до отказа и между отказами оборудования в масштабе наработки. Приведена методика расчета показателей непараметрической надежности ТПС на основе различной информации по выборке наработок до отказа и между отказами оборудования.*

**Ключевые слова:** информационные ресурсы, железнодорожный транспорт, тяговый подвижной состав, надежность и безотказность оборудования

При создании базы данных информационных ресурсов и программного обеспечения управления железнодорожным транспортом необходимо учитывать параметры и показатели непараметрической надежности тягового подвижного состава.

В настоящее время происходит замена морально и физически устаревшего парка тягового подвижного состава (ТПС). Обеспечение надежной работы ТПС при эксплуатации – важнейшее условие успешного функционирования железнодорожной отрасли, а надежность ТПС при эксплуатации, в свою очередь, зависит от множества факторов: качества отдельных узлов и агрегатов; условий эксплуатации; квалификации работников, эксплуатирующих и обеспечивающих надлежащее техническое состояние подвижного состава; правильно построенной системы технического обслуживания и ремонта [1].

Большое значение в решении задач, направленных на повышение надежности тягового подвижного состава, имеет мониторинг технического состояния его оборудования в процессе эксплуатации. При правильной систематизации информации о надежности появляется возможность решать задачи [1–3]:

- оценки показателей безотказности и долговечности конкретного оборудования в рассматриваемых условиях эксплуатации при фиксированной наработке его от начала эксплуатации (восстановления);
- зависимости от наработки показателей безотказности, что, в свою очередь, позволит оценить изменение технического состояния с увеличением наработки;

- построения рациональной системы ремонта с учетом реального ресурса оборудования ТПС в конкретных условиях эксплуатации;
- целесообразности и объема модернизации конкретного оборудования на основании анализа его надежности.

Для решения этих задач необходимо изменить подход к анализу и систематизации информации о надежности. Анализ результатов обработки информации показывает, что расчет такого показателя надежности, как число отказов на 1 млн километров (аналог показателя безотказности – параметра потока отказов), рассчитывается как отношение числа отказов конкретного оборудования за отчетный период к суммарному линейному пробегу локомотива за этот же период. Ошибки при анализе надежности исключаются при правильном формировании выборок наработок оборудования до отказа (между отказами).

Для каждого факта отказа должна быть зафиксирована наработка рассматриваемого оборудования до этого отказа от начала эксплуатации (восстановления):

- расчет показателей надежности должен осуществляться в зависимости от наработки оборудования, а не от календарного времени работы (месяца, года);
- расчет показателей безотказности – параметр потока отказов или интенсивность отказов – должен определяться как отношение числа отказов оборудования за рассматриваемый период наработки к суммарной наработке оборудования, находящегося в эксплуатации (под наблюдением) за этот же период.

При таком расчете надежности становится возможным оценивать изменение технического состояния оборудования с увеличением наработки, определять сроки своевременного его восстановления или замены.

Ошибка в анализе надежности заключается в том, что в определенный момент ТПС находится, как правило, в разных межремонтных периодах, а исследуемое оборудование имеет различную наработку от начала эксплуатации (восстановления). Таким образом, в одном календарном периоде рассматривается оборудование с разным техническим состоянием. Если проследить изменение качественного показателя (числа отказов на 1 млн км) при таком подходе, то можно не увидеть некоторой тенденции к его увеличению или уменьшению. Этот показатель будет колебаться около некоторого среднего значения.

Полученный результат будет свидетельствовать о том, что наработки до отказа (между отказами) распределены по экспоненциальному закону, т. е. поток отказов является простейшим, а показатель безотказности – интенсивность отказов (параметр потока отказов) – будет постоянен, т. е. не увеличивается с увеличением наработки. В этом случае, кажется, что не имеет смысла проводить планово-предупредительный ремонт, а следует выполнять ремонт по состоянию, но это не так. С увеличением наработки технические свойства оборудования ухудшаются. Интенсивность ухудшения зависит от вида оборудования, условий эксплуатации и многих других факторов.

В процессе эксплуатации тягового подвижного состава накапливается огромный объем информации как о наработках до отказа и между отказами оборудования, так и о значениях контролируемых параметров. Эта информация фиксируется в различных документах и системах (паспорт локомотива, АСУТ, КАСАНТ и т.п.), но, с точки зрения анализа надежности, пользы от этой информации нет. Это происходит из-за отсутствия правильной систематизации исходной информации о техническом состоянии ТПС, о контролируемых и диагностируемых параметрах, о наработках до отказа и между отказами конкретного

оборудования в рамках существующей системы ремонта. Вся информация о техническом состоянии ТПС должна быть привязана к соответствующей наработке рассматриваемого оборудования на момент измерения контролируемого (диагностируемого) параметра или наступления его отказа с указанием его вида и причины [1].

Такой подход к информационному обеспечению позволит в процессе эксплуатации ТПС реализовать планы испытаний на надежность ( $N, U, T$  или  $N, R, T$ ) [2]. Как известно, межремонтные пробеги ТПС до ремонта одного и того же объема разнесены во времени. Это делается, прежде всего, для равномерной загрузки ремонтных цехов. Если зафиксировать в соответствующих межремонтных периодах моменты отказов, то они также достаточно равномерно распределятся во времени. При ежемесячном расчете интенсивности отказов или параметра потока отказов, как это делается сейчас при эксплуатации оборудования, интенсивность (параметр потока) отказов будет являться постоянной величиной с увеличением наработки. Это – грубейшая ошибка при анализе эксплуатационной надежности, и проведение планового ремонта не только нецелесообразно, но и вредно.

На самом же деле естественно ухудшение технического состояния оборудования ТПС с увеличением его наработки, поэтому для правильной оценки показателей надежности оборудования по результатам его эксплуатации необходимо, прежде всего, представить межремонтные периоды ТПС и наработок до отказа и между отказами оборудования в масштабе наработки (рис. 1) [1, 4]. Это позволит увязать моменты отказов оборудования с величиной наработки, а также рассчитать для решения названных важных практических задач достоверные оценки показателей безотказности и долговечности, таких как: функция восстановления, расчетная функция распределения наработки до отказа, зависимость от наработки интенсивности отказов и параметра потока отказов оборудования ТПС в конкретных условиях его эксплуатации.

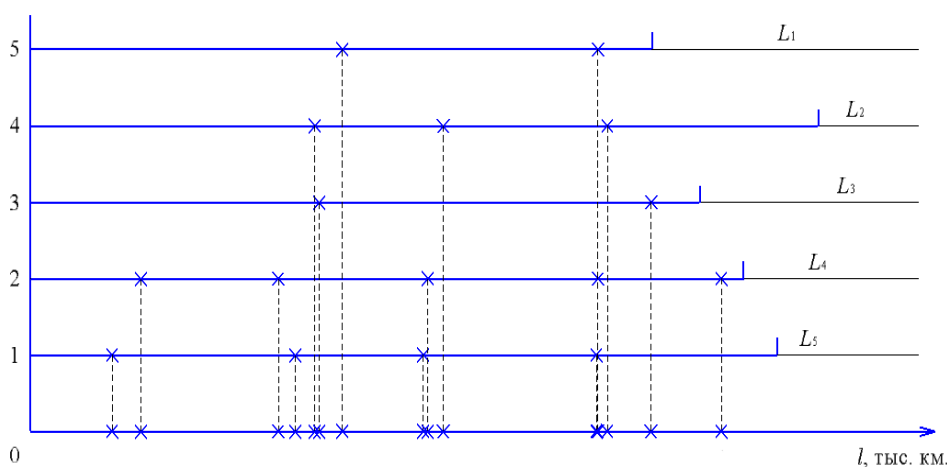


Рис. 1. Представление информации о наработках до отказа и между отказами одноименного оборудования ТПС в масштабе наработки:

$L$  – величина межремонтного пробега;  $x$  – моменты отказов одноименного оборудования

## РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБЪЕКТА ПО ВЫБОРКЕ НАРАБОТОК ДО ОТКАЗА

Для оценки показателей безотказности невосстанавливаемых объектов в рамках заданной наработки  $T$  реализуется план испытаний на надежность  $(N, U, T)$ . В качестве исходной информации для расчетов выступает выборка наработок до отказа оборудования  $t_i$ , объем которой равен  $r$ , т. е. количеству отказавших объектов. Так как в течение периода испытаний  $T$  не все объекты отказывают, то выборка наработок до отказа для  $N$  объектов усечена справа моментом окончания испытаний [3], следовательно, количество объектов, для которых в течение периода испытаний  $T$  отказы не возникли, составляет  $N - r$ .

Исходя из полученной в результате таких испытаний информации, можно рассчитать оценку вероятности отказа испытываемого оборудования к моменту проведения окончания испытаний  $T$ , как:

$$Q^*(T) = \frac{r}{N}. \quad (1)$$

Упорядочив наработки до отказа для всех  $r$  отказавших объектов в вариационный ряд в порядке возрастания, строится зависимость оценки вероятности отказа от наработки  $Q^*(t)$  в заданном периоде испытаний  $T$  (рис. 2).

По усеченной выборке рассчитывается и строится диаграмма интенсивности отказов (рис. 3). Для этого

период испытаний  $T$  разбивается на интервалы, подсчитывается число и вычисляется интенсивность отказов в каждом интервале:

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta n}{n(t) \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

где:  $\Delta n$  – число отказов в интервале наработки  $\Delta t$ ;  
 $n(t)$  – число объектов, работоспособных к началу рассматриваемого периода.

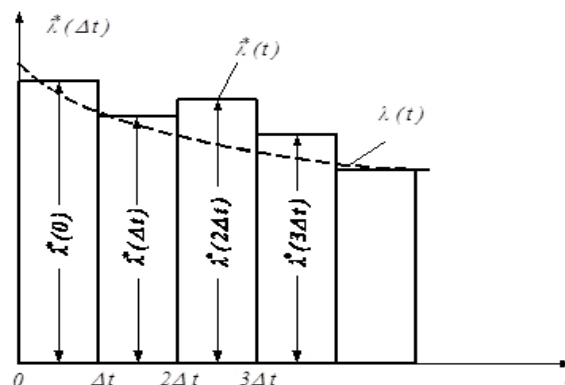


Рис. 3. Диаграмма интенсивности отказов

На основании полученных результатов оценивается изменение рассчитанных показателей безотказности в рассматриваемом периоде проведения испытаний (эксплуатации) объекта.

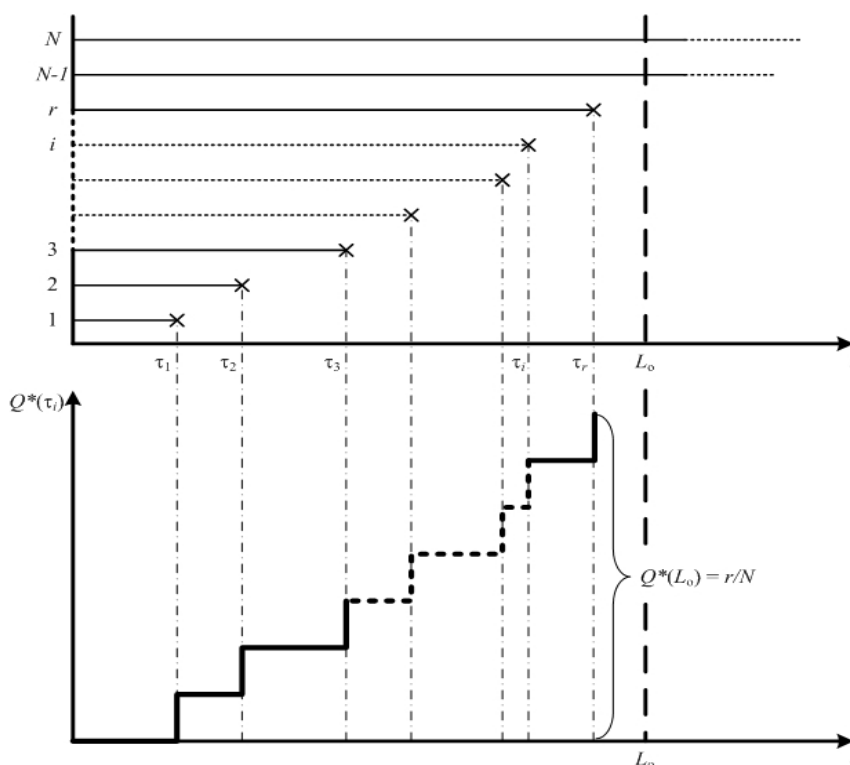


Рис. 2. Оценка вероятности отказа невосстанавливаемого объекта по усеченной выборке наработок до отказа

## РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБЪЕКТА ПО ВЫБОРКЕ НАРАБОТОК МЕЖДУ ОТКАЗАМИ

В процессе эксплуатации оборудования тягового подвижного состава фактически реализуется план испытаний на надёжность  $[N, R, T]$ . Каждый объект из выборки  $N$  находится в эксплуатации (испытаниях) в течение наработки  $T$  [2]. Процесс функционирования объекта осуществляется следующим образом: после его работы в течение случайного времени (наработки)  $\tau_1$  возникает отказ, затем происходит восстановление или объект заменяется новым за время несоизмеримо меньшее, чем наработка до отказа  $\tau_1$ . После наработки  $\tau_2$  объект вновь отказывает в эксплуатации и его снова восстанавливают или заменяют однотипным работоспособным. Далее процесс развивается аналогично. Поскольку все отказы возникают под действием одних и тех же факторов, естественно предположить, что наработки между отказами  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$  имеют один и тот же закон распределения:  $F(t) = \text{Вер}(\tau < t)$ .

Время отказов

$$t_1 = \tau_1; t_2 = \tau_1 + \tau_2; \dots; t_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$$

образует случайный поток, связанный с процессом восстановления объекта, который оценивается следующими показателями безотказности: параметром потока отказов, средней наработкой на отказ и вероятностью безотказной работы.

Определение параметра потока отказов осуществляется в соответствии с функцией восстановления  $H(t)$  — среднего числа отказов  $m(t)$  одного объекта за наработку  $t$ .

$$H(t) = M(m(t)), \quad (3)$$

где  $m(t)$  — число отказов одного объекта за наработку  $t$ .

Для опытного определения восстановления транспортного средства  $H(t)$  наблюдают за  $N$  экземплярами однотипных объектов и фиксируют число отказов каждого из них в течение наработки  $T$  [3]. Оценка среднего числа отказов, приходящихся на один экземпляр рассматриваемого объекта за наработку  $T$ , определяется следующим образом:

$$\bar{m}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t), \quad (4)$$

где  $m_i(t)$  — число отказов  $i$ -го объекта за наработку  $T$ .

По объединённому процессу восстановления, полученному в результате наложения  $N$  процессов конкретных объектов (например, колёс), можно графически представить функцию восстановления объекта  $\bar{m}(t)$  (рис. 4).

Зависимость  $m(t)$  — это ступенчатая линия, величина  $\bar{m}(t)$  сохраняет постоянное значение в промежутке между отказами отдельных объектов и возрастает скачком на  $1/N$  в момент очередного отказа.

Чем большее количество объектов будет поставлено под наблюдение, тем меньше будет интервал наработки  $\Delta t$  между соседними отказами и меньше окажется скачок  $1/N$ . В пределе, при  $N \rightarrow \infty$  ступенчатая линия стремится к некоторой непрерывной и плавной кривой  $H(t)$ , которая и является ведущей функцией процесса восстановления, т.е.

$$H(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \frac{m_i(t)}{N}. \quad (5)$$

По функции восстановления ТПС определяется параметр потока отказов объекта:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}. \quad (6)$$

Этот параметр характеризует скорость нарастания числа отказов при различных значениях наработки. Статистическая оценка параметра потока отказов в интервале наработки  $\Delta t$  представляется следующим образом:

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta m}{N \cdot \Delta t}. \quad (7)$$

Оценка параметра потока отказов осуществляется на основе информации о наработках между отказами  $N$  объектов. Для этого по наработкам между отказами отдельных объектов формируют объединённый процесс восстановления (см. рис. 4).

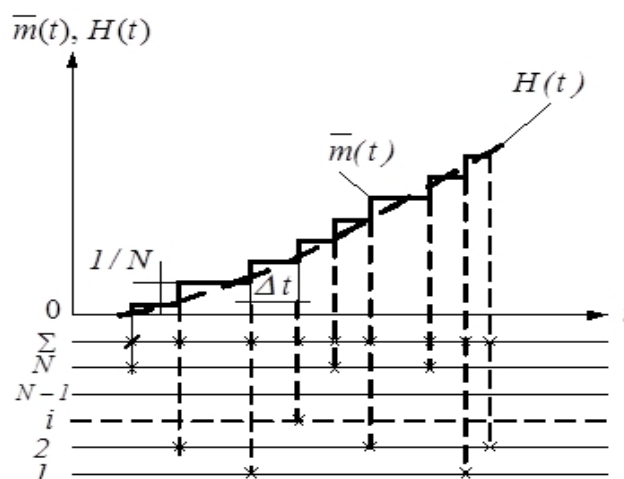


Рис. 4. Функция восстановления объекта

Период наблюдения  $T$  за объединённым процессом восстановления разбивают на более мелкие интервалы  $\Delta t$  [1]. По числу отказов  $\Delta m$  в каждом интервале наработки  $\Delta t$  определяют оценку параметра потока отказов  $\omega^*(t)$  по формуле (7) (рис. 5).

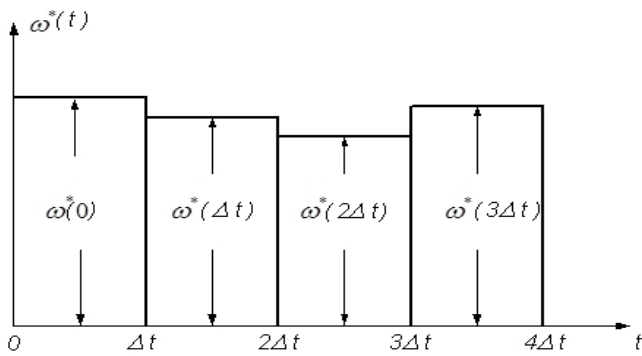


Рис. 5. Диаграмма потока отказов объекта

Статистическую оценку средней наработки между отказами можно определить по результатам эксплуатации (испытаний) ТПС в течение заданной наработки  $T$  одноименных  $N$ , восстанавливаемых (заменяемых) после отказа объектов [2].

По формуле (4) определяется оценка среднего числа отказов  $\bar{m}(t)$ , приходящихся на один объект за наработку  $T$ . Тогда оценка средней наработки между отказами будет:

$$T^* = \frac{T}{\bar{m}(t)}. \quad (8)$$

Если вид закона распределения наработки между отказами априори известен, то можно определить функцию вероятности безотказной работы  $P(t)$ .

\* \* \*

По полученным значениям и зависимостям от наработки показателей безотказности объектов и созданной на этой основе базе данных можно решать различные задачи по совершенствованию конструкций, технологий изготовления, восстановления и эксплуатации системы технического обслуживания и ремонта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горский А.В., Воробьев А.А. Оптимизация системы ремонта локомотивов. – М.: Транспорт, 1994. – 208 с.
2. Воробьев А.А., Горский А.В., Пузанков А.Д., Скребков А.В., Четвергов В.А., Швецов С.В. Надёжность подвижного состава: учебник. – М.: ФГБУ ДПО «УМЦ на жд. транспорте», 2017. – 300 с.
3. Воробьев А.А., Горский А.В., Козырев В.А., Лисенков А.Н., Шеремет Н.М. Эффективная система технического обслуживания и восстановления тягового подвижного состава // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика,

наука, технологии – 2016. – №9, ч. 2. – С. 36-40.

4. Скрипник В.М., Назин А.Е. Оценка надежности технических систем по цезурированным выборкам. – Минск: Наука и техника, 1981. – 143 с.
5. Резер С. М. Обеспечение безопасности и страхования рисков грузовых перевозок // Транспорт: наука, техника, управление (ВИНИТИ РАН). – 2016. – №5. – С. 3-11.
6. Елисеев С.Ю., Миронова О.В. Совершенствование системы управления железнодорожным транспортом, обслуживанием пассажиров и грузовладельцев // Транспорт: наука, техника, управление (ВИНИТИ РАН). – 2016. – №3. – С. 29-43.
7. Елисеев С.Ю., Шатохин А.А. Сокращение простоев грузовых вагонов в ожидании погрузки // Транспорт: наука, техника, управление (ВИНИТИ РАН). – 2016. – №5. – С. 19-22.
8. Туранов Х.Т., Молчанова О.В. Математические модели двухточечного контакта набегавшего колеса малонагруженной колёсной пары грузового вагона при воздействии пространственных систем сил // Транспорт: наука, техника, управление (ВИНИТИ РАН). – 2012. – №3. – С. 7-12
9. Крютченко В.Е. Амплитудно-фазовые координатные функции продольных колебаний транспортных средств // Транспорт: наука, техника, управление (ВИНИТИ РАН). – 2014. – № 7. – С.10-19
10. Косарев А.Б., Попов А.Ю., Сербиненко Д.В. Анализ влияния фильтров напряжения нулевой последовательности на показатели качества электрической энергии нетяговых потребителей при их питании от ВЛ10 кВ // Транспорт: наука, техника, управление (ВИНИТИ РАН). – 2012. – №3. – С.13-17.

*Материал поступил в редакцию 15.01.19.*

## Сведения об авторах

**ВОРОБЬЕВ Александр Алексеевич** – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТ – МИИТ), Москва  
e-mail: miit\_menagment@mail.ru

**ГОРСКИЙ Анатолий Владимирович** – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ – МИИТ  
e-mail: miit\_menagment@mail.ru

**КОЗЫРЕВ Валентин Александрович** – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Менеджмент и управление персоналом организации» РУТ – МИИТ  
e-mail: miit\_menagment@mail.ru