



Построение вероятностной модели надежности буксы



Евгений КРУГЛИКОВ

Evgeniy P. KRUGLIKOV

Construction of a Probabilistic Model of Axle Box Reliability

(текст статьи на англ. яз – English text of the article – p. 223)

В эксплуатации буксы грузового вагона подвержена значительным динамическим нагрузкам, что определяет ее сравнительно низкую долговечность и, как следствие, быстрый переход в скрытое аварийное состояние. Методика построения вероятностной модели надежности буксы позволяет определить момент перехода буксы в состояние отказа и предотвратить появление ряда негативных последствий для находящихся на линии вагонов: сход с рельс, крушение состава, непроизводительный простой вагонов и т.д. В статье установлено, что используемый автором закон распределения при проверке наработки буксы до отказа не противоречит опытным данным и сделанным расчетам.

Ключевые слова: железная дорога, букса, безопасность, аварийность, надежность, закон распределения, наработка до отказа.

Кругликов Евгений Павлович – аспирант отделения «Вагоны и вагонное хозяйство» ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»), Москва, Россия.

Уровень надежности в существующих условиях эксплуатации, а также требуемое его значение, определяемое общими транспортными задачами и условием обеспечения безопасности, имеют особый смысл при организации и выборе рациональных параметров системы технического обслуживания и ремонта. Буксовый узел – это один из важных узлов в конструкции вагона, из-за отказов которого происходит более половины всех сбоев в работе железнодорожного транспорта. Однако, как показали исследования, эффективность использования информации об отказах букс остается низкой, несмотря на внедрение электронных сетевых технологий.

Разработка вероятностной модели надёжности буксы, к которой будем относить и закон распределения наработки до отказа, и определение ее параметров на основе собираемой статистической информации могут стать основой при моделировании и прогнозировании отказов [1], расчетном обосновании параметров системы технического обслуживания и ремонта вагона.

Сейчас на сети железных дорог функционирует система централизованного

пономерного учета грузовых вагонов, на базе которой ГВЦ ОАО «РЖД» ведет в реальном режиме времени отслеживание технического состояния каждого вагона. Со всего полигона сети собирается статистическая информация обо всех выявленных отказах, в том числе букс. Эта информация может стать материалом для вероятностной модели надежности буксы. Методика ее получения включает несколько принципиально важных этапов. Требуется обосновать вид закона распределения наработки до отказа (модель отказа), определить стандартный план испытаний на надежность и его параметры, получить статистическую информацию (выборку), обработать результаты эксперимента и дать точечные оценки параметров рассматриваемой модели, проверить их качество.

ВЫБОР МОДЕЛИ ОТКАЗА БУКСЫ

В исследовании [2] с помощью построения дерева отказа буксы получено обобщенное выражение закона распределения наработки до отказа буксы. Однако собираемой ныне статистической информации недостаточно для его воспроизводства. Вместе с тем существует достаточно большой перечень классических законов надежности, используемых при моделировании отказов различных элементов конструкции. Каждый из них имеет определенную специфику и область применения.

Например, показательный закон описывает закономерности появления внезапных отказов в период нормальной эксплуатации [1], то есть тех отказов, у которых нет внешних признаков приближения к неработоспособному состоянию. Отказ буксы не является внезапным, кроме того, существует косвенный признак отказа – повышение рабочей температуры буксы. Еще один часто используемый закон – закон нормального распределения. При этом предполагается, что все факторы, оказывающие влияние на появление отказа изделия, независимы и среди них нет доминирующего. Но таким свойством нельзя охарактеризовать факторы, влияющие на переход буксы в неработоспособное состояние [2].

В работе [3] приведено обоснование того, что наработка до отказа буксы распределена по закону Вейбулла – Гнеденко:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad (1)$$

где a и b – соответственно параметры масштаба и формы.

Этот закон является универсальным и обобщающим, поскольку при определенных значениях параметров он «трансформируется» в другие описанные теоретические законы.

ПЛАН ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ

Такой план представляет собой правила, согласно которым выполняется сбор первичной статистической информации. Нарушение этих правил не позволяет корректно применить методы теории вероятностей и математической статистики. План определяет объем выборки, критерий окончания эксперимента и как поступают с отказавшим узлом. Эксперимент состоит в том, что одновременно начинается наблюдение за несколькими идентичными деталями (точнее – находящимися в одинаковом состоянии).

Стоит отметить, что существующие информационные технологии, использующие базы данных, в которых собирается и хранится информация об обнаруженных отказах вагонов в эксплуатации, позволяют организовать эксперименты на основе информационного архива, то есть ретроспективной информации. Благодаря им можно начать слежение за однотипными объектами, выпущенными в разное время, считая, что наблюдение за ними начато одномоментно. На базе собираемой статистической информации возможен эксперимент согласно стандартному плану испытаний на надёжность типа [NUT]. В качестве примера в наш непосредственный эксперимент были включены вагоны, выпущенные в 2005-2007 годах на одном из отечественных вагоностроительных заводов. Количество вагонов в эксперименте N (объем выборки) – 22888. Продолжительность наблюдения T выбрана с учетом того, что вагон за время экспе-





Пример вариационного ряда наработок

Сквозной индекс I	Индекс наработки до отказа i	Наработка до отказа τ_i , мес.	Индекс безотказной наработки j	Безотказная наработка t_j , мес.
1	1	2,4	-	-
2	2	3,5	-	-
3	3	4,8	-	-
.....	-	-
927	927	19,97	-	-
928	-	-	1	20
929	-	-	2	20
930	-	-	3	20
.....
22888	-	-	21961	20

римента не должен попасть в первый после постройки деповской ремонт, при котором колесные пары с буксами могут быть заменены. Минимальный период для отобранных объектов составляет 20 месяцев.

ПОЛУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Отказом буксового узла будем считать событие, состоящее в переводе вагона в состав неисправных (в отцепку) по нагреву или сдвигу буксы. Факт обнаружения осмотровиком вагонов отказа буксового узла оформляют в установленном порядке и передают в информационный центр с помощью сообщения формы 1353 с кодом неисправности вагона 150 или 151 соответственно (по действующему классификатору неисправностей грузовых вагонов). Поскольку наиболее ответственные элементы конструкции вагона, к которым относится и букса, высоконадежные изделия, а их отказы непосредственно влияют на безопасность движения, то получаемая выборка будет неполной и сильно цензурированной. Это важная особенность моделей отказов для ответственных деталей и узлов [4]. Согласно собранной статистической информации, в выборке 927 наработок до отказа и почти 22 тыс. безотказных наработок. Пример вариационного ряда наработок полученной выборки приведен в таблице 1.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

На этом этапе требуется определить точечные оценки параметров выбранной

ранее модели отказа a и b . Для их нахождения воспользуемся методом максимального правдоподобия, который позволяет получить эффективные, несмещённые, состоятельные оценки. Функция правдоподобия для неполной выборки имеет вид:

$$L = \sum_{i=1}^m \ln f_{\tau_i}(t) + \sum_{j=1}^n \ln(1 - F_{t_j}(t)), \quad (2)$$

где $f_{\tau_i} = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$ – выражение плот-

ности распределения наработки отказа, соответствующей выбранной модели (1); m – количество наработок до отказа; n – количество безотказных наработок; F_{t_j} – функция распределения наработки до отказа, выражение (1).

Проведя процедуру поиска экстремума максимума функции правдоподобия, получим выражения для определения точечных оценок параметров a и b :

$$\hat{a} = \frac{\left(\sum_{i=1}^m \tau_i^{\hat{b}} + \sum_{j=1}^n t_j^{\hat{b}}\right)^{\frac{1}{\hat{b}}}}{m^{\frac{1}{\hat{b}}}}; \quad (3)$$

$$\frac{m}{\hat{b}} = -\sum_{i=1}^m \ln \tau_i + m \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i^{\hat{b}} \ln \tau_i + \sum_{j=1}^n t_j^{\hat{b}} \ln t_j}{\sum_{i=1}^m \tau_i^{\hat{b}} + \sum_{j=1}^n t_j^{\hat{b}}}. \quad (4)$$

Из выражения (4) получить точечную оценку параметра b в явном виде не представляется возможным. Для этого используем наиболее наглядный графический метод. Обозначив в выражении (4) левую часть f_1 , правую часть f_2 , построим

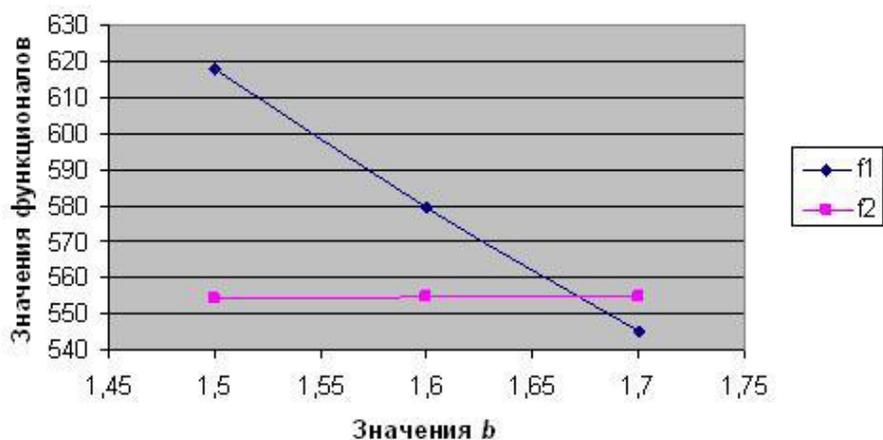


Рис. 1. Определение точечной оценки параметра формы закона распределения Вейбулла–Гнеденко для буксы.

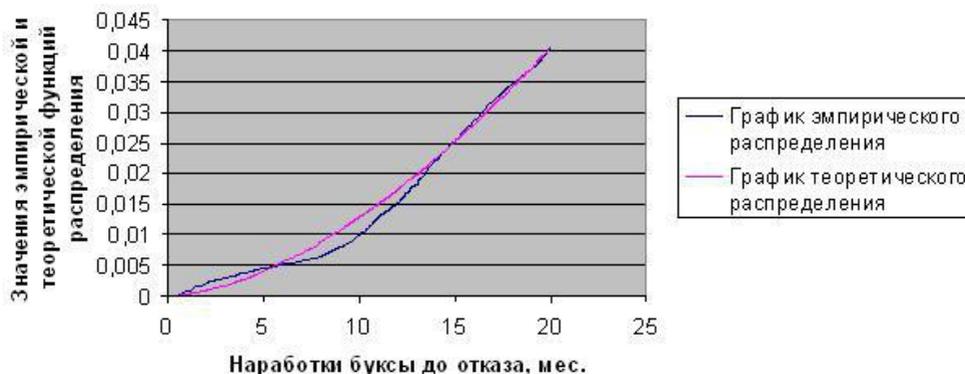


Рис. 2. Сопоставление теоретического и эмпирического распределений наработки буксы до отказа.

графики этих функций (рис. 1). По точке пересечения графиков определяется значение оценки параметра b .

Таким образом, значение точечной оценки параметра b принимаем 1,68.

Подставив полученное значение в выражение (3), получаем значение точечной оценки параметра масштаба:

$$\alpha = 133,3 \text{ мес.} \approx 11,1 \text{ лет.}$$

То есть получаем теоретическую функцию распределения наработки до отказа – искомую модель (выражение закона распределения наработки вагона до отказа):

$$F(\tau_i) = 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{133,3}\right)^{1,68}}. \quad (5)$$

ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА ТОЧЕЧНЫХ ОЦЕНОК

Для подтверждения гипотезы о том, что полученная модель отказа (5) описы-

вает полученную выборку, необходимо проверить согласованность теоретической функции распределения (5) и экспериментальной кривой (эмпирической функции). Проверку будем осуществлять с помощью критерия Колмогорова. Для чего требуется определить максимальное расхождение между теоретической и эмпирической функциями и сравнить его с максимально допустимым значением. С помощью функции Джонсона на основе вариационного ряда (таблица 1) получены ординаты эмпирической функции:

$$\hat{F}_0(\tau_i) = \frac{r_i}{v+1}, \quad (6)$$

где $r_i = r_{i-1} + \frac{v+1-r_{i-1}}{v+2-l}$ – вспомогательный коэффициент; v – количество элементов в выборке; при определении r_1 значение $r_0 = 0$.





Для подтверждения справедливости гипотезы о близости принятого теоретического закона распределения наработки буксы до отказа и функции F_0 с помощью критерия согласия Колмогорова требуется проверить условия:

если $D \cdot \sqrt{n} < t_\alpha$ – принятая гипотеза о распределении наработки буксы до отказа по Вейбуллу–Гнеденко не противоречит опытным данным;

если $D \cdot \sqrt{n} > t_\alpha$ – расхождение между теоретическим и эмпирическим распределениями следует признать существенным: принятая гипотеза о распределении наработки буксы до отказа по закону Вейбулла–Гнеденко противоречит опытным данным. Здесь D – максимальная разность (расхождение) между значениями теоретической и эмпирической функций распределения наработки до отказа; n – объем выборки; t_α – квантиль распределения Колмогорова уровня α .

Как видно из графиков функций (рис. 2) наибольшее расхождение между теоретическим и эмпирическим распределениями достигается в точке 10 мес. и составляет $D = 0,00298$.

Соответствующее значение квантиля распределения при уровне значимости ошибки в 5% составляет $t_\alpha = 1,44$. Поэтому можно с вероятностью не меньшей 95% принять, что выбранный нами теоретический закон распределения наработки буксы до отказа не противоречит опытным данным [1].

ВЫВОДЫ

Полученные точечные оценки параметров закона распределения наработки до отказа буксы можно использовать при решении практических задач, моделировании отказа, имитационном и статистическом моделировании, а также при оценке влияния показателей надежности буксы на параметры системы технического обслуживания и ремонта грузовых

вагонов. Кроме того, приведенная методика может быть положена в основу централизованной автоматизированной системы оценки надежности и безопасности элементов вагонных конструкций на этапе непосредственного использования вагонов по назначению, что позволит повысить эффективность использования существующей информационной системы контроля технического состояния вагонного парка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устич П. А., Карпычев В. А., Овечников М. Н. Надежность рельсового нетягового подвижного состава. – М.: УМЦ МПС РФ, 2004. – 416 с.
2. Кругликов Е. П. Анализ надежности буксы: построение дерева событий // Мир транспорта. – 2014. – № 2. – С. 82-89.
3. Мартынов И. Э. Развитие научных основ и разработка комплекса мероприятий по повышению надежности буксовых узлов вагонов. – Харьков, 2007. – 297 с.
4. Тихов М. С. Оценивание показателей качества по неполным выборкам // Надежность и контроль качества. – 1996. – № 11. – С. 16-24.
5. Федоткин М. А. Основы прикладной теории вероятностей и статистики. Учебник. – М.: Высшая школа, 2006. – 368 с.
6. Федоткин М. А. Модели в теории вероятностей. Учебник. – М.: Наука–Физматлит, 2012. – 608 с.
7. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
8. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. Практикум. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
9. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. – 278 с.
10. Федотова Г. А. Международный научный семинар «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». Проспект. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009.
11. Reliability Model Selection // Proceedings of the 28th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'04), 2004, pp. 534-539.
12. Миронов А. А., Волков В. М. Статистический подход к оценке требуемого объема контроля сварных соединений крупногабаритных металлоконструкций // Приволжский научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 12-16.
13. Bansiya, J., Davis, C. A Hierarchical Model for Object-Oriented Design Quality Assessment // IEEE Transactions on Software Engineering, 2002, V. 28, Iss. 1, pp. 4-17.
14. Волков В. М., Миронов А. А., Миронов Н. А. Модель расчета ресурса цилиндрических оболочек в условиях износа толщины стенки // Вестн. Волжской гос. акад. водного транспорта. – 2008. – Вып. 25. – С. 108-117. ●

Координаты автора: Кругликов Е. П. – kruuug@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 12.12.2014, принята к публикации 27.03.2015.