Оценка параметра потока отказов вагонокомплекта дверей пассажирского поезда

Мария В. Белоусова¹, Виталий В. Булатов^{2*}, Николай В. Смирнов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Российская Федерация, Санкт-Петербург

*bulatov-vitaly@yandex.ru

Мария В.
Белоусова

Виталий В.
Булатов

Николай В.
Смирнов

Резюме. Оценка параметров потоков отказов является необходимой при эксплуатации промышленных изделий. Она осуществляется на базе статистических данных об отказах, возникающих при функционировании в технических объектах в реальных условиях. В технической документации на изделие данный показатель обязательно указывается в разделе «Оценка параметров надежности». В области анализа надежности подвижного состава до сих пор существуют сложности с определением методики оценки данного параметра с учетом уровней системы. Для анализа многокомпонентной системы целесообразно разработать структурную схему надежности и учесть возможные замещающие элементы (резервные элементы). Зачастую многокомпонентные системы представляются различными структурными схемами, где в том числе может быть использована структура « m из n », т.е. система с параллельным соединением элементов, которая работоспособна тогда, когда работают не менее m элементов. Примером такой системы является комплект дверей пассажирского вагона. Производители и заказчики могут по-разному подходить к методу расчета показателей надежности технической системы: сначала определяется требуемое значение показателя безотказности на весь состав, которое задает требования по надежности к вагону. В то же время значение показателя надежности на вагон определяется значениями показателей надежности, входящих в него компонентов (подсистем, узлов и деталей). Между тем далеко не всегда учитывается характер взаимосвязи между компонентами вагона и самим вагоном. При этом производителям вагонов удобно и целесообразно задавать в нормативной документации (а затем и контролировать в эксплуатации) показатели надежности на комплект дверей (компоненты вагона в данной работе) как единой системы. Однако критерии отказа комплекта заданы далеко не всегда. В данной статье рассматривается метод расчета параметра потока отказов для вагонокомплекта дверей, которые входят в состав пассажирского вагона, на основе данных о порядке функционирования дверей и значении параметра потока отказов на одну дверь. **Цель.** Предложить подход к расчету параметра потока отказов вагонокомплекта из 6 дверей на основе анализа возможных структурных схем надежности с последующим переходом к графам переходов и состояний. **Выводы.** Разработаны различные варианты структурных схем расчета надежности комплекта дверей пассажирского вагона в зависимости от критерия отказа системы. Произведен расчет параметра потока отказов вагонокомплекта дверей вагона по разработанным структурным схемам. Сделан вывод о том, что применение метода расчета параметра потока отказов на базе марковских процессов является более приоритетным, чем логико-вероятностный подход, так как учитывает фактор восстановления. Предложена методика расчета параметра потока отказов и времени восстановления дверей вагонокомплекта для структурной схемы надежности «3 из 4» на базе марковских процессов.

Ключевые слова: безотказность, параметр потока отказов, структурная схема надежности, вагонокомплект дверей, марковские процессы.

Для цитирования: Белоусова М.В., Булатов В.В., Смирнов Н.В. Оценка параметра потока отказов вагонокомплекта дверей пассажирского поезда // Надежность. 2021. №3. С. 20-26. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-20-26>

Поступила 20.06.2021 г. / После доработки 23.07.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей является обеспечение высокого уровня надежности железнодорожного транспорта. Безопасность перевозок пассажиров напрямую связана с оценкой показателей безотказности компонентов подвижного состава. Поставщики компонентов для пассажирских вагонов должны осуществлять оценку показателей надежности за согласованный с заказчиком (вагоностроительным заводом) период времени. Производственные площадки, в свою очередь, отчитываются перед транспортными компаниями, оценивая показатели надежности выпускаемой продукции – вагонов. Отсюда возникает разница в подходах к количественной оценке:

1) производители вагонов рассчитывают показатели надежности на вагон, а их поставщики – на отдельные узлы и элементы;

2) методика оценки показателей надежности для вагонов отличается от методики оценки надежности компонентов подвижного состава в силу разных уровней функционирования и конструктива. Это выражается в том, что для оценки средней наработки на отказ вагона будет применим экспоненциальный закон распределения, а для подножек, например, в зависимости от исполнения могут использоваться как экспоненциальный, так и нормальный, а также закон распределения Вейбулла [1]. Экспоненциальное распределение типично для сложных объектов, состоящих из многих элементов с различным распределением наработки [2]. В силу того,

что вагонокомплект состоит из механических (ручных дверей) и автоматических (электромеханических) боковых и торцевых дверей, целесообразно использовать экспоненциальный закон распределения при оценке показателей надежности. Предположение о марковском характере переходов сложной системы обусловливается тем, что если каждый из элементов системы имеет приблизительно экспоненциальный закон распределения безотказной работы, то поведение всей системы может быть описано марковским процессом [3]. В состав автоматических дверей входит программируемый блок управления, который предназначен для реализации функции открытия/закрытия створок, а также для обработки информации, поступающей с индуктивных датчиков положения и датчиков «помеха в створе». Помимо этого, параметр потока отказов дверей принят постоянным в нормальный период эксплуатации в соответствии с результатами применения критерия по ГОСТ Р МЭК 60605-6-2007. Вследствие этого целесообразно полагать, что наработка на отказ двери имеет экспоненциальный закон распределения, и для расчета параметра потока отказов вагонокомплекта дверей было принято решение применить марковский анализ.

Производители пассажирских вагонов учитывают показатели надежности на весь вагонокомплект дверей (4-6 шт., в зависимости от модели) по следующему правилу: значение параметра потока отказов двери умножается на их количество в вагоне, что с точки зрения структурной надежности говорит об элементарной последовательной структуре, где отказ одной двери чаще

а)

б)

в)

г)

Рис. 1. Модели пассажирских вагонов, рассматриваемых относительно структурных схем надежности: а) модель 61-4447 (некупеческий); б) модель 61-4462 (купеческий); в) модель 61-4460 (вагон-ресторан); г) модель 61-4445 (купеческий штабной)

всего приравнивается к отказу вагона, что является спорным заключением.

Для корректного определения характера функционирования дверей в составе вагона с учетом иерархичности связей был рассмотрен структурный подход. Структурная схема надежности (Reliability block diagram, RBD) представляет собой графическое изображение работоспособного состояния системы. Она показывает логическую связь функционирующих компонентов, необходимых для успешной работы системы [4]. Однако методы моделирования на основе структурной схемы надежности предназначены для невозстанавливаемых систем, у которых порядок появления отказов не имеет значения. Для восстанавливаемых объектов и систем, в которых должен учитываться порядок появления отказов, более подходящими являются другие методы, такие как марковский анализ [5-8]. В процессе исследования, для отображения функционирования системы в целом, за основу был положен структурный подход, на основе которого с учетом восстановления системы был осуществлен переход к графу состояний и переходов [4].

Объект исследования

Двери наружные предназначены для оборудования всех типов пассажирских вагонов с конструкционной скоростью движения до 200 км/ч (рис. 1). Двери обеспечивают комфортные и безопасные условия: торцевые – перехода между вагонами, боковые – входа в вагон и выхода из вагона наружу; исключают воздействие резких перепадов давления и температуры; препятствуют попаданию внутрь тамбура вагона пыли и влаги; обеспечивают шумо- и теплоизоляцию тамбура вагона при всех режимах эксплуатации поезда.

На рис. 2 представлена схема расположения разных типов дверей максимальной комплектации вагона.

Рис. 2. Схема расположения дверей пассажирского вагона: 1 – дверь боковая одностворчатая с электроприводом; 2 – дверь боковая одностворчатая с ручным приводом; 3 – дверь торцевая одностворчатая с электроприводом.

Структурные схемы надежности вагонокомплекта

Структурную схему надежности вагонокомплекта дверей можно строить в различных вариантах. С точки зрения анализа модели, предполагается, что в рас-

считываемых случаях контроль системы – полный, а переключатели обладают идеальной надежностью. Наиболее простым представлением вагонокомплекта дверей является нерезервированная система (рис. 3), где отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. Тогда вероятность безотказной работы системы рассчитывается по известной формуле:

$$P_{cl} = \prod_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

где P_i – вероятность безотказной работы элемента; N – количество элементов в системе.

Рис. 3. Линейная структурная схема надежности вагонокомплекта дверей для пассажирского вагона, где E_i – дверь с электроприводом; B_i – торцевая дверь.

Вторым возможным вариантом представления структурной схемы надежности вагонокомплекта дверей является схема с отдельным постоянным резервированием с целой кратностью. Различные способы резервирования, а также выигрыши надежности от них подробно рассматриваются в [9], методы оценки влияния технического обслуживания на эффективность резервирования описаны в [10]. В общем случае вероятность безотказной работы данной схемы рассчитывается по формуле:

$$P_p = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i) \quad (2)$$

Для вагонокомплекта рассмотрим комбинированные варианты схем:

- резервирование ручной двери второй ручной (рис. 4а);
- резервирование боковых автоматических дверей ручными (рис. 4б).

Рис. 4. Резервированные структурные схемы надежности вагонокомплекта дверей для пассажирского вагона, где E_i – боковая дверь с электроприводом; B_i – торцевая дверь, H_i – дверь с ручным приводом.

Таким образом, получаем два варианта смешанной системы с поэлементным резервированием отдельных блоков.

Вероятность безотказной работы с резервированием дверью с ручным приводом (рис. 4а) рассчитывается по формулам (1) и (2):

$$P_{c2} = P_{B1} \cdot P_{E1} \cdot P_{B2} \cdot P_{E2} \cdot [1 - (1 - P_{H1}) \cdot (1 - P_{H2})].$$

Вероятность безотказной работы с резервированием боковых дверей с электромеханическим приводом дверьми с ручными приводами (рис. 4б) рассчитывается так:

$$P_{c3} = P_{B1} \cdot P_{B2} \cdot [1 - (1 - P_{E1}) \cdot (1 - P_{H1})] \cdot [1 - (1 - P_{E2}) \cdot (1 - P_{H2})].$$

Еще одним возможным применимым подходом к структурной оценке является представление вагонокомплекта как структуры « m из n » [4]. Систему такого типа

Рис. 5. Структурные схемы « m из n » для оценки надежности вагонокомплекта дверей пассажирского вагона, где Еі – дверь с электромеханическим приводом; Еі(Н) – дверь с электромеханическим приводом в ручном режиме эксплуатации; Ві – торцевая дверь; Ві(Н) – дверь торцевая с электромеханическим приводом в ручном режиме эксплуатации; Ні – дверь с ручным приводом.

можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, которая работоспособна, когда работают хотя бы m элементов из n ($m < n$).

Здесь опишем три варианта:

- система «3 из 4», которая считается работоспособной, когда работают двери Н1, Е1 и Е2 (рис. 5а);
- система «5 из 6», в которой учитывается возможная работа дверей с электромеханическим приводом в ручном режиме Еі(Н) (рис. 5б).
- система «5 из 6», в которой учитывается возможная работа боковых и торцевых дверей с электромеханическим приводом в ручном режиме Еі(Н) и Ві(Н) (рис. 5в).

Обе представленные структуры являются смешанными: к « m из n » добавляются последовательно соединенные или поэлементно зарезервированные торцевые двери.

Тогда, при условии равнонадежности всех элементов, входящих в структуру « m из n », вероятность безотказной работы для структуры, представленной на рис. 5а, будет равна:

$$P_{c4} = P_{B1} \cdot P_{B2} \cdot (4 \cdot P_m^3 - 3 \cdot P_m^4),$$

где P_m – элемент структуры « m из n ».

Вероятность безотказной работы для структуры, представленной на рис. 5б, при тех же условиях:

$$P_{c5} = P_{B1} \cdot P_{B2} \cdot (6 \cdot P_m^5 - 5 \cdot P_m^6).$$

Наконец, вероятность безотказной работы для структуры, представленной на рис. 5в, где рассматривается работа торцевой двери как в ручном, так и в автоматическом режиме:-

$$P_{c6} = [1 - (1 - P_{B1}) \cdot (1 - P_{B1(H)})] \cdot [1 - (1 - P_{B2}) \cdot (1 - P_{B2(H)})] \cdot (6 \cdot P_m^5 - 5 \cdot P_m^6).$$

Расчет параметра потока отказов для структурных схем вагонокомплекта

Произведем оценку параметра потоков отказов для структур, представленных на рис. 4б, 5а-в. Среднюю наработку до отказа системы можно представить в следующем виде:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^n] dt,$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы.

Осуществим замену переменных

$$1 - e^{-\lambda t} = x \Rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{1-x} \Rightarrow dt = \frac{1}{\lambda(1-x)} dx.$$

Тогда

$$T = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{1-x^n}{1-x} dx = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{-(x-1)(x^{n-1} + x^{n-2} + \dots + x + 1)}{1-x} dx = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{x^n}{n} \Big|_0^{\infty} + \frac{x^{n-1}}{n-1} \Big|_0^{\infty} + \dots + \frac{x^2}{2} \Big|_0^{\infty} + x \Big|_0^{\infty} \right) = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right).$$

Табл.1. Результаты расчета параметров потоков отказов для разных структурных схем вагонокомплекта

Тип схемы	Графическое отображение	Значение параметра потока отказов, λ , км ⁻¹
Резервирование боковых автоматических дверей ручными		$\lambda_c = 5,5566 \times 10^{-6}$
Система «3 из 4» с последовательно соединенными торцевыми дверьми		$\lambda_c = 6,1917 \times 10^{-6}$
Система «5 из 6», в которой учитывается возможная работа дверей с электромеханическим приводом в ручном режиме		$\lambda_c = 7,88 \times 10^{-6}$
Система «5 из 6», в которой учитывается возможная работа боковых и торцевых дверей с электромеханическим приводом в ручном режиме		$\lambda_c = 6,7694 \times 10^{-6}$

Рис. 6. Граф состояний для структуры «3 из 4» с последовательно соединенными торцевыми дверьми.

Таким образом, для системы « m из n » получаем

$$T = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + \frac{1}{m} \right). \quad (3)$$

Исходными данными для расчета являются значения параметра потока отказов одной двери $\lambda = 1,667 \times 10^{-6}$ 1/км и параметра потока восстановления $\mu = 0,041$ 1/км.

процессов, является приоритетным, так как учитывает фактор восстановления. Таким образом, последнее значение параметра потока отказа системы применимо для рассматриваемой структурной схемы надежности «3 из 4» для мониторинга показателей безотказности вагонокомплектов дверей при эксплуатационных испытаниях.

Рассмотренные в статье подходы позволяют заказчику компонентов подвижного состава и изготовителю согласовать методики расчета надежности сложных систем и избежать применения противоречащих друг другу вариантов расчета показателей безотказности при переходе от элемента к системе. Описанный метод на данный момент используется для расчета нормируемого значения средней наработки на отказ вагонокомплекта дверей, установленных в вагоны скоростных поездов дальнего следования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70001.

Библиографический список

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
2. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. М.: Издательский дом «Академия», 2010. 304 с.
3. Атовмян И.О., Вайрадян А.С., Руднев Ю.П. и др. Надежность автоматизированных систем управления. М.: Высшая школа, 1979. 288 с.
4. ГОСТ Р 51901.14-2007 Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. М.: Стандартинформ, 2008. IV, 23 с.
5. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: ЛЕНАНД, 2014. 219 с.
6. Bernd Bertsche. Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. Springer, 2008. 502 p.
7. Marvin Rausand. Reliability of safety-critical systems: theory and application. Wiley, 2014. 468 p.
8. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. М.: Высшая школа, 1977. 160 с.
9. Половко А.М. Основы теории надежности. М.: Наука, 1964. 448 с.

10. Дружинин Г.В. Надежность систем автоматики. 2 изд. М.: «Энергия», 1967. 528 с.

11. Воронов А.А. Теория автоматического управления. 2 изд. М.: Высшая школа, 1986. 504 с.

Сведения об авторах

Мария Владимировна Белоусова – аспирант кафедры моделирования экономических систем, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: 27bmw1993@mail.ru

Виталий Владимирович Булатов – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru

Николай Васильевич Смирнов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой моделирования экономических систем, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: n.v.smirnov@spbu.ru

Вклад авторов в статью

Белоусова М.В. Реализовала расчет параметров потока отказов для структурных схем вагонокомплекта, разработала граф-состояний для структуры вагонокомплекта «3 из 4», оценила показатели надежности для вагонокомплекта на основе марковских случайных процессов.

Булатов В.В. Описал объект исследования, концептуально оценил применимость приводимых математических методов для рассматриваемых систем подвижного состава и разработал структурные схемы надежности для вагонокомплекта пассажирского вагона.

Смирнов Н.В. Совместно с Белоусовой М.В. сформулировал математическую постановку задачи, проверил корректность всех рассуждений и выкладок, предложил интерпретацию полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.