

УДК 621.3.019.3  
DOI 10.17513/snt.39815

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ ДВЕРЕЙ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ПО ДАННЫМ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Булатов В.В.

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru*

Правильное решение задачи повышения уровня качества и надежности автоматизированных систем возможно при учете многих факторов: разработка методов количественной оценки показателей надежности, применение современных методологий анализа надежности (анализ дерева неисправностей, анализ опасности и работоспособности и др.), внедрение на предприятии системы передачи сообщений об отказах и внесении исправлений (FRACAS). В статье рассмотрен алгоритм оценки наработки до отказа элемента автоматизированной системы в процессе эксплуатации. Рассмотрение проводилось на примере приводных ремней торцевых и боковых автоматических дверей прислонно-сдвижного типа пассажирских вагонов. Даны рекомендации и уточнения по алгоритму расчета надежности с учетом особенностей рассматриваемого узла автоматической двери. Разобран численный пример точечной и интервальной оценки показателя надежности наработка до отказа. Затронут вопрос обработки полученных значений наработки до отказа на базе анализа видов и последствий отказов (FMEA), подразумевающий пересмотр протокола FMEA и пересчет приоритетного числа рисков (ПЧР). Представленная методология направлена на широкий круг читателей (инженеры-конструкторы, инженеры по надежности, инженеры по качеству), а также будет полезна руководителям отделов промышленных предприятий, которые выпускают серийную продукцию и проводят оценку показателей надежности согласно гарантийным обязательствам.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы, приводной ремень двери вагона, отказы, нормальный закон распределения, расчет надежности

## ASSESSMENT OF RELIABILITY INDICATORS OF ELEMENTS OF AUTOMATIC DOORS OF PASSENGER CARS ACCORDING TO DATA FROM OPERATION

Bulatov V.V.

*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg,  
e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru*

The correct solution to the problem of increasing the level of quality and reliability of automated systems can be possible by taking into account many factors: the development of methods for quantitative assessment of reliability indicators, the use of modern methodologies for reliability analysis (fault tree analysis, hazard and operability analysis, etc.), the introduction of a message transmission system at the enterprise Failures and Corrections (FRACAS). The article discusses an algorithm for estimating the time to failure of an automated system element during operation. The consideration was carried out using the example of drive belts of the end and side automatic doors of the lean-and-slide type of passenger cars. Recommendations and clarifications are given on the algorithm for calculating reliability, taking into account the characteristics of the automatic door unit under consideration. A numerical example of a point and interval estimate of the time-to-failure reliability indicator is analyzed. The issue of processing the obtained time-to-failure values based on failure modes and consequences analysis (FMEA) is touched upon, implying a revision of the FMEA protocol and recalculation of the priority number of risks (PRN). The presented methodology is aimed at a wide range of readers – design engineers, reliability engineers, quality engineers, and will also be useful to heads of departments of industrial enterprises that produce serial products and evaluate reliability indicators in accordance with warranty obligations.

**Keywords:** automated systems, car door drive belt, normal distribution law, failures, reliability calculation

Отказы в автоматизированных системах возникают под воздействием разнообразных факторов и являются случайными событиями.

Из существующего опыта наиболее часто встречающимися законами распределения при оценке показателей надежности узлов автоматизированных систем являются экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла и нормальное распределение.

Экспоненциальное распределение является типичным для сложных объектов, состоящих из многих элементов с различным распределением наработки. Также отметим, что в автоматизированных системах поток отказов каждого узла формируется из суммы потоков отказов его составных элементов [1].

Однако в некоторых случаях необходимо оценить показатели надежности отдельных узлов и элементов автоматизированной системы, например привода дверей

пассажирских вагонов. Этот расчет даст возможность скорректировать состав ЗИП и оптимизировать плановое техническое обслуживание системы. Работа элементов и узлов системы может быть описана различными распределениями. Рассмотрим более подробно нормальное распределение при оценке показателей надежности.

Нормальное распределение случайной величины возникает тогда, когда на эту величину воздействует большое число однородных по своему влиянию случайных факторов, при этом влияние каждого из этих факторов по сравнению с совокупностью всех остальных является незначительным [2, с. 38]. Если перенести это условие на отказы технических систем, то нормальный закон достаточно точно описывает работы изделий на этапе старения и износа [3].

Нормальное распределение характеризуется двумя параметрами  $\mu$  и  $\sigma$ , которые численно равны математическому ожиданию и среднему квадратическому отклонению. Следует учесть, что на практике находит применение усеченный нормальный закон распределения, так как величина времени не может быть отрицательной.

В [4; 5] систематизирована информация по применению нормального закона распределения в надежности, которая опубликована в отечественной и зарубежной литературе, представлены зависимости, позволяющие провести оценивание основных показателей надежности.

Однако до сих пор в литературе отсутствуют методические рекомендации проведения расчета надежности технических систем по нормальному закону распределения согласно реальным данным из эксплуатации.

Цель исследования – рассмотреть процесс оценки наработки до отказа элементов автоматизированных систем на базе нормального закона распределения по данным из эксплуатации и сформировать ряд практических рекомендаций для проведения расчета.

#### Материалы и методы исследования

В общем случае порядок оценки надежности по данным из эксплуатации можно отобразить следующей схемой (рис. 1).

Рассмотрим оценку параметра наработки до отказа на примере элементов и узлов автоматических наружных дверей пассажирских вагонов (рис. 2). Двери наружные для пассажирских вагонов обеспечивают вход в вагон и выход из вагона наружу, защиту тамбура вагона от воздействия климатических внешних воздействующих факторов и предотвращают несанкционированный доступ внутрь вагона [6].

Согласно [7, с. 5] наработка до отказа – это наработка объекта от начала его эксплуатации или момента его восстановления до отказа. Исходя из определения данный показатель надежности может быть использован как для восстанавливаемых, так и для невосстанавливаемых систем.

В качестве объекта исследований определим *приводной ремень*. Основной тип отказа – обрыв. Изделие невосстанавливаемое, поэтому рассмотрим оценку параметра наработки до отказа по данным из эксплуатации.

На первом этапе определим объем испытаний. Для оценки показателя средней наработки до отказа принимаем план испытаний NUz. Согласно [8, с. 13] для нормального распределения объем необходимой выборочной совокупности объекта ( $N$ ) определяется по формуле

$$N = \left( \frac{r}{\Phi\left(\frac{\chi-1}{v}\right)} \right), \quad (1)$$

где  $r$  – прогнозируемое число отказов;

$\chi$  – относительная продолжительность испытаний;

$v$  – коэффициент вариации.

Предположим, что доверительная вероятность составляет  $q = 0,9$ , относительная ошибка  $\varepsilon = 0,1$ , а коэффициент вариации  $v = 0,3$ . Тогда согласно [8, с. 15] для показателя «средняя наработка до отказа» прогнозируемое число отказов будет составлять  $r = 16$ .

Произведем оценку относительной продолжительности испытаний согласно формуле

$$\chi = T_{и} / T_{ср}, \quad (2)$$

где  $T_{и}$  – продолжительность испытаний в сутках,

$T_{ср}$  – заданная в технических условиях требуемая наработка до отказа.

Допустим, что согласно технической документации имеем  $T_{ср} = 18000$  ч (не менее 750 суток).

Продолжительность испытаний определим из выражения

$$T_{и} = T_{г} \cdot K_{ти}, \quad (3)$$

где  $T_{г}$  – количество дней наблюдений;

$K_{ти}$  – коэффициент технического использования пассажирских вагонов.

Рассмотрим расчет приводных ремней за год. Подставим численные значения в (3) и получим

$$T_{и} = 365 \cdot 0,85 \approx 310 \text{ суток.}$$

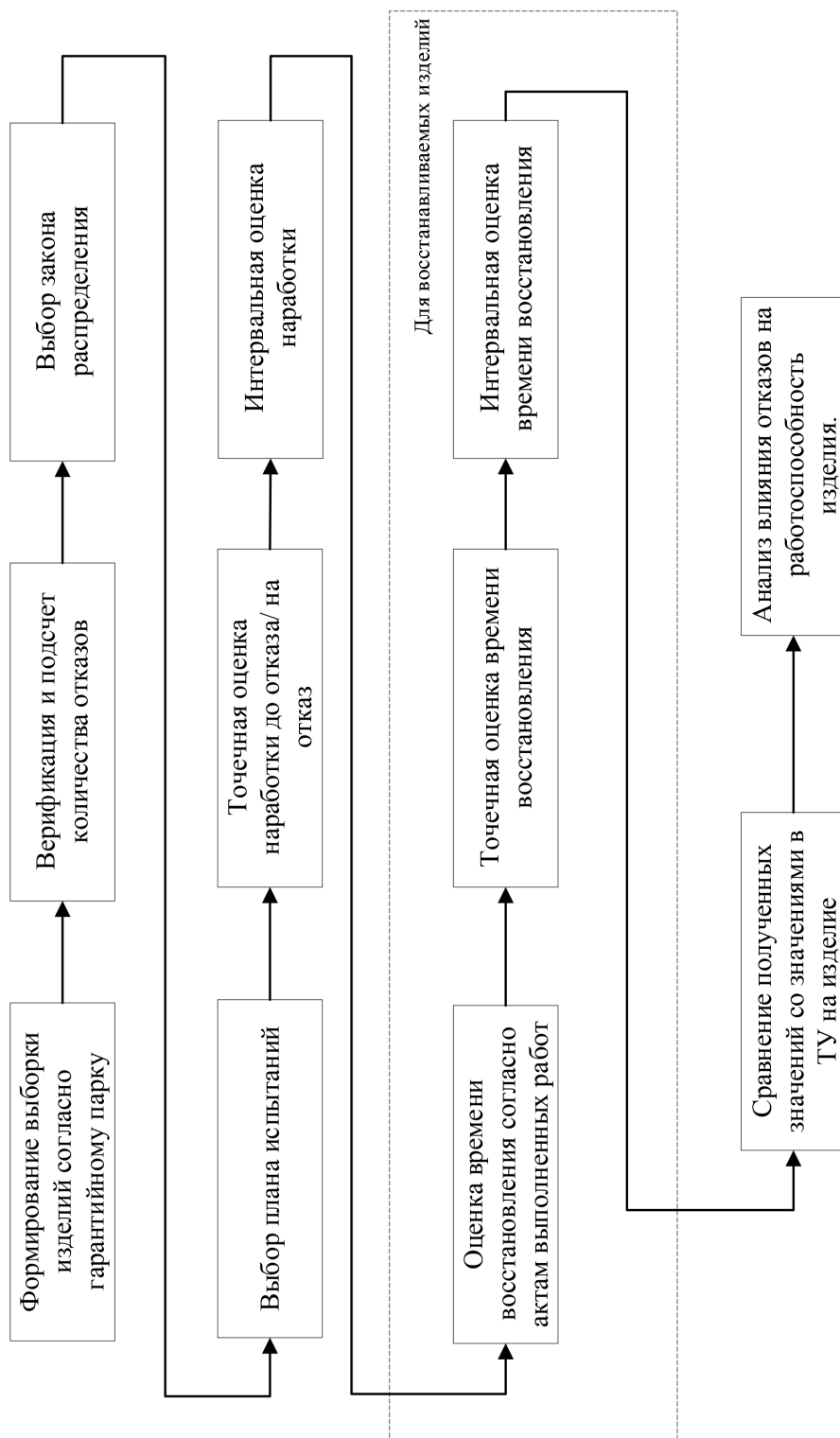


Рис. 1. Порядок расчета показателей надежности в эксплуатации

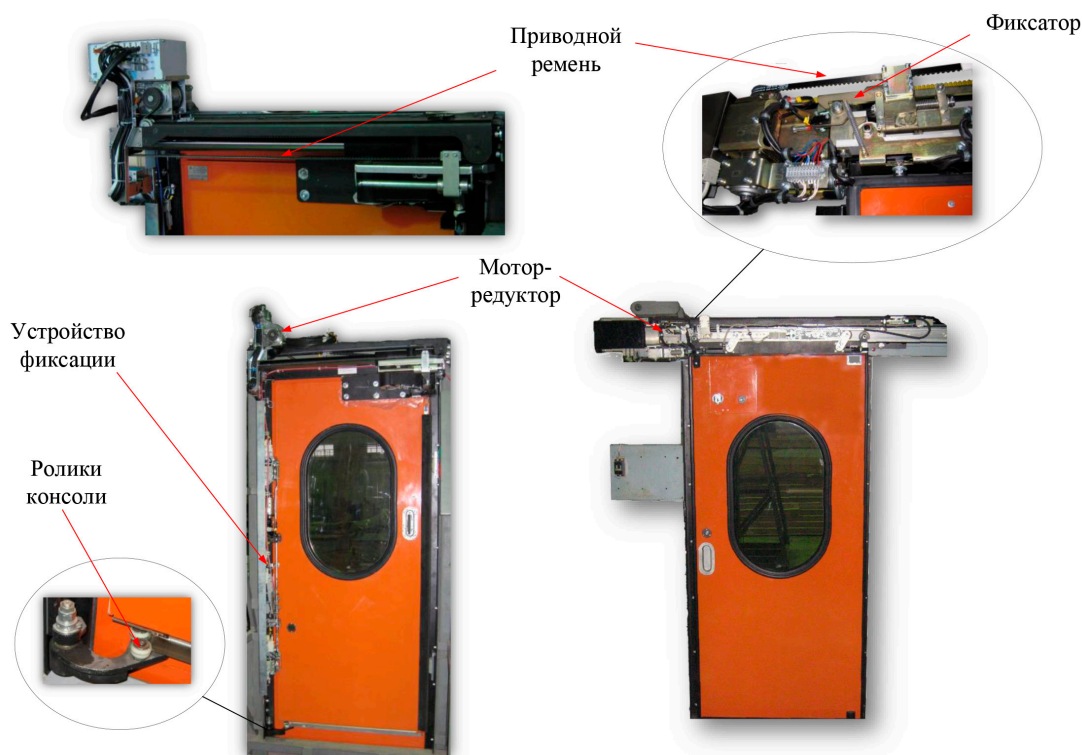


Рис. 2. Элементы дверей пассажирского поезда, работу которых можно описать нормальным законом распределения

Следует отметить, что некоторые компоненты вагонов могут также иметь свой среднегодовой коэффициент технического использования (например, система отопления). Тогда выражение (3) переписывается как

$$T_n = T_r \cdot K_{ти} \cdot K_{тиэ},$$

где  $K_{тиэ}$  – коэффициент технического использования элемента или компонента вагона.

Подставляя в формулу (2) числовые значения, получаем

$$\chi = 310 / 750 = 0,41.$$

Значение  $\Phi$  определяем из таблицы значений функции стандартного нормального распределения. Для удобства можно воспользоваться средствами MS Excel, применив функцию НОРМСТРАСП(z). Подставляя в (1) числовые значения, получим

$$N = \left( \frac{16}{\Phi\left(\frac{0,41-1}{0,3}\right)} \right) = 610 \text{ шт.}$$

Исходными данными для определения наработки до отказа являются данные по отказам, которые получены по результатам эксплуатации за год.

Далее обозначим выборку пассажирских вагонов. Предположим, что имеется 300 ед. Тогда фактическое количество приводных ремней составит 1200 шт. (в учет возьмем только автоматические двери вагона – две торцевые и две боковые двери рабочего тамбура). Таким образом, условие о необходимом минимальном объеме выборочной совокупности приводных ремней выполняется:

$$N_{\phi} = 1200 > N = 610.$$

Определим суммарную наработку приводных ремней, которые установлены на боковые и торцевые двери пассажирских вагонов исследуемой выборки, за назначенный период наблюдения.

$$T_{\phi} = \sum_{i=1}^n T_{квi} \cdot k_{типр} \cdot N_{пр},$$

где  $T_{квi}$  – суммарная календарная наработка  $i$ -го пассажирского вагона за время наблюдения, сутки;

$k_{типр}$  – коэффициент технического использования приводных ремней (принимается равным коэффициенту технического использования вагонов);

$N_{пр}$  – общее количество приводных ремней, установленных на автоматические двери вагона.

Разобьем наработку на две части – наработка отказавших приводных ремней и наработка работоспособных приводных ремней. Предположим, что в первом случае это 1000 суток, а во втором – 80 000 суток.

Тогда фактическая наработка отказавших приводных ремней составит

$$\sum_{i=1}^r (t_i \cdot K_{\text{Типр}}) = 1000 \cdot 0,85 = 850 \text{ суток,}$$

где  $t_i$  – наработка  $i$ -го приводного ремня до отказа.

Фактическая наработка приводных ремней, не имеющих отказы, будет составлять

$$\sum_{j=1}^n (\tau_j \cdot K_{\text{Типр}}) = 80000 \cdot 0,85 = 68000 \text{ суток,}$$

где  $\tau_j$  – наработка  $j$ -го приводного ремня до цензурирования.

Таким образом получаем суммарную фактическую наработку:

$$T_{\phi} = \sum_{i=1}^r t_i + \sum_{j=1}^n \tau_j = 850 + 68000 = 68850 \text{ суток.}$$

Перейдем непосредственно к оценке средней наработки до отказа.

Точечная оценка средней наработки до отказа ( $\mu$ ) вычисляется в соответствии с [8, с. 73]:

$$\mu = \frac{A}{B} + \sigma \cdot \frac{D}{B}, \tag{4}$$

где

$$\sigma = \frac{E - A \left( \frac{D}{B} \right) + \sqrt{\left( E - A \frac{D}{B} \right)^2 + 4d \left( C - \frac{A^2}{B} \right)}}{2d} \tag{5}$$

– оценка среднеквадратического отклонения нормального распределения.

В (5)  $A, B, C, D, E$  – вспомогательные промежуточные параметры, которые рассчитываются следующим образом:

$$A = \sum_{i=1}^r t_i + 0,64 \cdot \sum_{j=1}^n \tau_j = 850 + 0,64 \cdot 68000 = 44370,$$

$$B = r + 0,64 \cdot (N - r) = 20 + 0,64 \cdot (1200 - 20) = 775,2,$$

$$C = \sum_{i=1}^r t_i^2 + 0,64 \cdot \sum_{j=1}^n \tau_j^2 = (850)^2 + 0,64 \cdot (68000)^2 = 2960082500,$$

$$D = 0,8 \cdot (N - r) = 0,8 \cdot (1200 - 20) = 944,$$

$$E = 0,8 \cdot \sum_{j=1}^n \tau_j = 0,8 \cdot 68000 = 54400,$$

где  $N$  – суммарное количество приводных ремней на вагонах,  $N_{\phi} = 1200$  шт.;

$d = r$  – число отказов наблюдаемых приводных ремней из выборки вагонов за рассматриваемый период. Определим  $d = 20$ .

Подставим числовые значения в (5) и получим

$$\sigma = \frac{54400 - 44370 \left( \frac{944}{775,2} \right) + \sqrt{\left( 54400 - 44370 \frac{944}{775,2} \right)^2 + 4 \cdot 20 \left( 2960082500 - \frac{44370^2}{775,2} \right)}}{2 \cdot 20} = 12170 \text{ суток.}$$

Далее осуществим точечную оценку средней наработки до отказа по формуле (4) и получим

$$\mu = \frac{44370}{775,2} + 12170 \cdot \frac{944}{775,2} = 14877 \text{ суток, или } \mu_{\text{ч}} = 14877 \cdot 24 = 357048 \text{ часов.}$$

Произведем оценку наработки до отказа по нижней доверительной границе согласно формуле

$$\mu_{\text{н}} = \mu - t_q(r-1) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{r}}, \quad (6)$$

где  $t_q(r-1)$  – квантиль распределения Стьюдента;

$r$  – число отказов.

По таблице 72 [8, с. 115]  $t_q(r-1)$  при  $r=20$  составляет 1,3253.

Подставляя числовые значения в формулу (6), получим

$$\mu_{\text{н}} = 14877 - 1,3253 \cdot \frac{12170}{\sqrt{20}} = 11269 \text{ суток}$$

или  $\mu_{\text{нч}} = 11269 \cdot 24 = 270456$  часов.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Таким образом, получаем, что для наблюдаемой совокупности приводных ремней автоматических дверей средняя наработка до отказа по нижней доверительной границе составляет  $\mu_{\text{нч}} = 270456$  ч, что больше, чем установлено в технической документации на изделие ( $T_{\text{ср}} = 18000$  ч).

По итогам расчета наработки до отказа происходит анализ полученных значений, формируется ряд действий в проектной и эксплуатирующей организациях:

1. Пересмотр протокола по анализу видов и последствий отказов (АВПО/ФМЕА) [9]. По итогам «мозгового штурма» группы инженеров происходит перерасчет приоритетного числа риска (ПЧР) и при необходимости вносятся изменения в конструкцию или технологический процесс.

2. При необходимости производится поиск нового поставщика элемента системы или улучшаются его качественные характеристики на базе предприятия-изготовителя.

3. Оптимизируется состав и количество ЗИП. Если рассматривать конкретный пример, то эта оптимизация должна быть проведена в депо и на вагоноремонтных заводах.

4. Внедрение RCM-систем (Reliability centered maintenance) на производстве для предупреждения отказов, что обеспечит эффективный уровень требуемой безопасности, готовности и экономической эксплуатации изделия [10].

#### Заключение

В статье рассмотрен алгоритм расчета показателей надежности элемента автоматической двери пассажирского поезда. Представленный численный пример разъясняет методологию оценки наработки до отказа приводного ремня двери как невосстанавливаемого элемента системы. Также даны рекомендации, которые будут полезны при анализе эксплуатационной надежности сложных технических систем.

#### Список литературы

1. Белоусова М.В., Булатов В.В. Практическое применение цепей Маркова для выбора наилучшего типа резервирования автоматизированной системы // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10–1. С. 9–13.
2. Голицкевич Т.А. Прикладная теория надежности. М.: Высшая школа, 1977. 160 с.
3. Березкин Е.Ф. Надежность и техническая диагностика систем. СПб.: Лань, 2023. 260 с.
4. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Аухадеев А.Э. Практическое применение нормального закона распределения в теории надежности технических систем // Известия вузов. Электротехника. 2016. № 4 (546). С. 96–99.
5. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Идиятуллин Р.Г. Практическое применение непрерывных законов распределения в теории надежности технических систем // Надежность. 2016. № 4 (59). С. 17–23.
6. Булатов В.В. Оценка надежности автоматизированных систем в процессе эксплуатации // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 6. С. 3–7.
7. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2021. 46 с.
8. РД 50-690-89 Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. М.: Госстандарт, 1990. 136 с.
9. ГОСТ Р 27.303-2021 Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. М.: Стандартинформ, 2021. 70 с.
10. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности. Ч. 2. Надежность технических систем. СПб.: Лань, 2023. 240 с.