

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-192; 621.8-1/-9; 620.178.4/.6

doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-11-18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ ПАР

Игорь Олегович Романов✉

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия
ig_romanov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0647-1677>

Аннотация

Оценкой эффективности и экономической целесообразности использования технических изделий по времени является их надежность, которая прогнозируется на этапе проектирования. Техническую задачу прогнозирования необходимого уровня надежности следует рассматривать с позиции работоспособного состояния отдельных элементов и их сопряжений в заданных условиях эксплуатации. Внешние условия и отклики элементов на них определяют характеристику изменения параметров технического состояния, выбор которых следует проводить с точки зрения анализа физики процессов, приводящих к отказу.

В большинстве случаев контактные пары, в том числе пары трения скольжения с периодическими ударными воздействиями в процессе эксплуатации подвержены износу, поэтому одним из параметров работоспособного состояния являются их геометрические размеры, снижение которых во

времени определяет скорость изменения параметра от его начального до предельного значения. Построение данной функциональной зависимости позволяет в любой момент времени определять среднее значение параметра, контролировать достижение его предотказного значения и, как следствие, прогнозировать появление отказа.

Построение кривой скорости изменения параметра, определяющего работоспособное состояние контактной пары в соответствии с представленными в статье подходами, является только первым этапом прогнозирования надежности. Не менее сложным является этап выбора материала, обеспечивающего заданный уровень надежности.

Ключевые слова: прогнозирование, надежность, параметр, методическая основа, контактные пары, элемент, система, предотказное состояние, безотказность.

Ссылка для цитирования:

Романов И.О. Определение показателя безотказности по техническому состоянию элементов контактных пар / И.О. Романов // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 6. – С. 11-18. doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-11-18.

Original article

Open Access Article

DETERMINATION OF THE RELIABILITY INDICATOR ACCORDING TO THE TECHNICAL CONDITION OF THE ELEMENTS OF CONTACT PAIRS

Igor Olegovich Romanov✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia
ig_romanov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0647-1677>

Abstract

The assessment of the effectiveness and economic feasibility of using technical products over time is their reliability, which is predicted at the design stage. The technical task of predicting the required lev-

el of reliability should be considered from the perspective of the functional state of certain elements and their mating under specified operating conditions. The external conditions and the response of the elements to

them determine the characteristics of changes in the parameters of the technical condition, which should be chosen from the point of view of analyzing the physics of the processes leading to failure.

In most cases, contact pairs, including sliding friction pairs with periodic impacts, are subject to wear during operation, therefore, one of the parameters of their working condition is their geometric dimensions, which decrease in time determines the rate of the parameter change from its initial to the limiting value. The construction of this functional dependence allows determining the average value of the parameter at any

time, control the achievement of its pre-failure value and, as a result, predict failure.

The construction of the curve of change rate of the parameter determining the workable state of the contact pair in accordance with the approaches presented in the paper is only the first stage of reliability predicting. No less difficult is the stage of choosing a material that provides a given level of reliability.

Keywords: prediction, reliability, parameter, methodological basis, contact pairs, element, system, pre-failure condition, safety margin.

Reference for citing:

Romanov IO. Determination of the reliability indicator according to the technical condition of the elements of contact pairs. *Transport Engineering*. 2024;6:11-18. doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-11-18.

Введение

Современное машиностроение представляет собой отрасль по реализации процессов разработки и изготовления сложных промышленных устройств, представляющих собой технические системы, состоящие из множества подсистем, взаимосвязанных по принципу иерархии. Рассмотрение указанной взаимосвязи определяет необходимость прогнозирования надежности как самих технических систем, так и их структурных составляющих. В первую очередь, особое внимание уделяется достижению заданного уровня указанного потребительского свойства на всех этапах жизненного цикла машиностроительной продукции (проектирование, изготовление, эксплуатации, ремонт и т.д.).

Прогнозирование надежности неразрывно связано с решением теоретических и прикладных вопросов оценки работоспособного состояния системы в заданных условиях. Внешние воздействия, в которых работают технические системы, обуславливают переменные факторы, определяющие сложность прогнозирования комплексных и единичных показателей надежности, одним из которых является безотказность.

В настоящее время прогнозирование безотказности базируется, в большей степени, на статистической информации, полученной по данным эксплуатации (по количеству отказавших) технических устройств, и теоретических расчетах. Использование указанного подхода возможно для широкой номенклатуры уже разработанных и эксплуатируемых длительное

время изделий, но не учитывает физические процессы, протекающие в изделии при внешних воздействиях, что характеризует возникновение внезапных отказов. Данное обстоятельство усложняет назначение показателей надежности для вновь проектируемых (в следствие отсутствия статистики их отказов) изделий. В тоже время, широкая номенклатура изделий и наличие в технических системах хорошо изученных принципов взаимодействия элементов в контактных парах при различных внешних условиях, например, пар трения скольжения с периодическими ударными воздействиями, позволяет на их примере установить взаимосвязь между изменениями параметров технического состояния под влиянием внешних условий во времени и показателями надежности, в частности безотказности.

Целью работы является разработка теоретических принципов определения показателя безотказной работы контактной пары на оценке скорости изменения параметров технического состояния элементов с учетом условий эксплуатации.

В соответствии с поставленной целью в работе предлагается решить следующие задачи:

- оценить изменение параметра технического состояния элемента контактной пары во времени в зависимости от внешних воздействий и условий эксплуатации;
- по оценке скорости изменения параметра и рассеяния его значений выбрать нормативные и предельные значения параметра, характеризующие предотказное

состояние и отказ элемента соответственно;

- применить выбор нормативного и предельного значения параметра на сопряженный элемент контактной пары;

- разработать математический аппарат оценки безотказности контактной пары

с учетом предельного значения параметра технического состояния системы.

Применение данного методического подхода позволит прогнозировать предотказное состояние системы и показатель безотказности элементов контактной пары в любой временной интервал до достижения системой предельного состояния.

Методика определения вероятности безотказной работы по изменению параметров технического состояния элементов

Надежность машиностроительной продукции является одним из основных потребительских свойств. В теории надежности в настоящее время можно выделить четыре основных направления [1, 2, 3]:

- разработка моделей и методов анализа технических систем;

- подготовка исходных данных для моделей надежности;

- управление надежностью на основе испытаний и эксплуатации;

- автоматизация надежности.

Во всех направлениях прослеживается необходимость рассмотрения взаимосвязи комплексных показателей надежности и экономической эффективности через единичные (безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость, долговечность). При этом, в первую очередь, особое внимание уделяется вопросам прогнозирования и обеспечения надежности, в основе которых лежат принципы определения безотказности системы и ее элементов, что отражено в работах [4-6]. Наиболее характерными показателями безотказности являются вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ, гамма процентная наработка на отказ.

При рассмотрении показатели безотказности могут быть вероятностными или статистическими. Вероятностная форма чаще всего используется при аналитических подходах, статистическая – при их экспериментальном определении. В ряде случаев предполагают, что интенсивность отказов во времени является постоянной, что не справедливо для динамических систем, к которым относятся пары трения скольжения с периодическими ударными воздействиями.

Проблеме повышения ресурса указанных контактных пар, использование которых имеет широкое распространение (система «цапфа – подшипник скольжения» в опоре шарошечного долота, узлы пневмо – и гидроударников, контактные пары в двигателях внутреннего сгорания, элементы фрикционных поглощающих аппаратов железнодорожного подвижного состава и т.д.) посвящено достаточно большое количество работ, конечной целью которых является снижение износа трущихся поверхностей.

Развитие физико-механических процессов разрушения сопряженных элементов пар трения скольжения при ударе, в первую очередь, связано с дезинтеграцией их поверхностных слоев, в частности с выкрашиванием, пластическим деформированием, циклической и статической усталостью, которая зависит не только от внешних воздействий, но и от площади контактирования. Изменение условий контактирования функционально связано с периодом эксплуатации и может варьироваться в пределах полного, частичного или локального (точечного) взаимодействия. Соответственно, в начальный период в паре трения скольжения силовые нагрузки распределяются по всей поверхности. По мере неравномерного разрушения поверхностного слоя, увеличивается зазор, перераспределяются удельные нагрузки, усиливается роль динамических воздействий, преобразуются коэффициенты трения, что существенно отражается на изменении геометрических размеров элементов. К примеру, во фрикционном поглощающем аппарате в работе контактной пары «подвижная пластина – корпус» происходит

уменьшение толщины стенки корпуса и сечения пластины в зоне трения.

С другой стороны, изменение геометрических параметров (Пр) элементов рассматриваемых пар в некоторых допустимых пределах, выраженное переменными значениями в результате отклика (О) системы, до предельно допустимого значения сечения, характеризует работоспособное состояние (рис. 1) самих элементов и, как следствие, пары трения скольжения. Данный факт, определяет существенную роль геометрических параметров, обеспечивающих безотказность элементов при оценке надежности рассматриваемых пар трения, с точки зрения анализа физики процессов, приводящих к отказу [7].

В этом случае под откликом системы следует понимать изменения в структурных элементах системы, возникающие в результате внешних воздействий. Протекание структурных изменений связано с временными интервалами. Тогда, общую наработку системы целесообразно разделить на два вида:

- предотказную τ_1 , т.е. продолжительность (или объем работы), соответствующая достижению системой предотказных значений параметров (Пр $_{\tau_1}$);
- на отказ $\tau_{\max}$, т.е. продолжительность (или объем работы), соответствующая достижению системой предельных значений параметров.

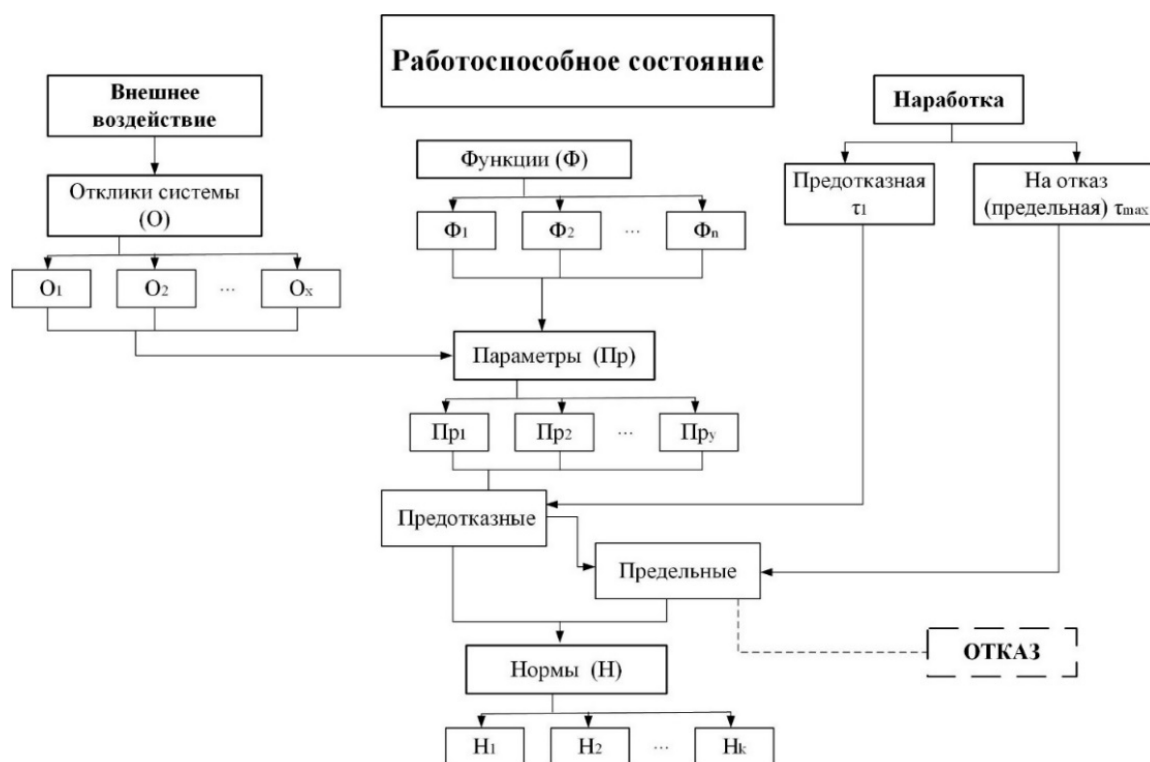


Рис. 1. Формализованная схема работоспособного состояния
Fig. 1. A formalized scheme of a functional state

В большинстве случаев эксплуатационные отказы имеют постепенный характер, связанный с усталостью и износом поверхностного слоя элементов контактной пары и уменьшением их площади сечения. Поскольку достижение критических изменений (выше некоторого порогового уровня) является причиной отказа любому пре-

дельному уровню всегда предшествует его предотказное значение (рис. 2).

Всегда будут выполняться условия неравенства (1)

$$\tau_1 < \tau_{\max} \quad (1)$$

Тогда значения параметров в любой момент времени можно выразить как функцию

$$\text{Пр} = f(\tau) \quad (2)$$

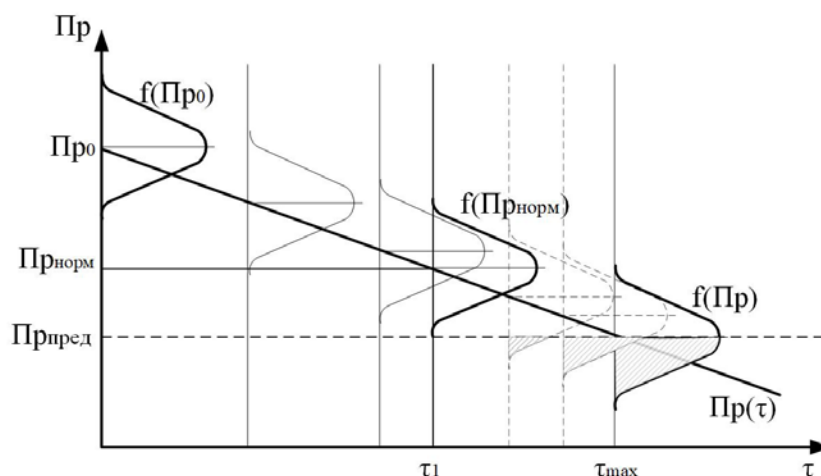


Рис. 2. Схема определения предотказного состояния
Fig. 2. The scheme for determining the pre-failure condition

При этом справедливо будет неравенство

$$\text{Пр}_{\tau_1} < \text{Пр}_{\tau_{\max}}, \quad (3)$$

где Пр_{τ_1} – предотказное значение параметра, соответствующее нормативному значению, $\text{Пр}_{\tau_{\max}}$ – предельное значение параметра, характеризующее отказ элемента.

Для графического отображения (рис. 2) приняты допущения, что случайные изменения параметров $f(\text{Пр})$ в заданный момент времени имеет нормальный закон распределения. В эксплуатации рассеяние значений параметров возможно по любому известному закону теории надежности (экспоненциальный, гамма-распределение, Вейбулла и т.п.) [8-12]. Основные параметры изделия независимы.

С течением времени эксплуатации, начальное значение параметра Пр_0 уменьшается по зависимости $\text{Пр}(\tau)$. Эта функция случайна во времени и характеризует скорость изменения начального параметра. Закон изменения параметра от начала эксплуатации до предельного состояния может быть аппроксимирован линейной, степенной, экспоненциальной и др. зависимостями.

Данные зависимости позволяют в любой момент времени определить среднее значение параметра. При этом в случае не достижения значений параметра предельного уровня существует вероятность отказа некоторой доли изделий из выборки (заштрихованная область). В этом случае в

интервале времени от τ_1 до $\tau_{\max}$, параметр состояния следует считать предельным.

С другой стороны, значение параметра, соответствующего τ_1 , соответствует нормативному значению этого параметра, в данном случае предотказного состояния. Выбор нормативного значения геометрического параметра следует проводить по результатам испытаний или эксплуатации с учетом угла наклона кривой $\text{Пр}(\tau)$. Например, для корпуса фрикционных поглощающих аппаратов нормативной документацией установлено минимально допустимое значение толщины стенки 16 мм.

В соответствии с кривой $f(\text{Пр})$ в заданный момент времени $\tau_{\max}$ 50 % изделий в выборке будут иметь значения параметра выше допустимой величины, а 50 % – ниже, что соответствует развитию критического уровня предельного параметра.

Очевидно, что при достижении параметром одного из элементов контактной пары предельного значения другой элемент (в зависимости от функции изменения его параметров во времени) имеет свои предельное значение и наработку τ_2 на предотказное состояние (рис. 3).

В большинстве случаев время изменения параметров элементов контактной пары до предотказного состояния τ_1 и τ_2 различны.

Для оценки параметров элементов пар трения скольжения, изменение которых связано с износом, можно принять прямую зависимость

$$П(\tau) = Пр_0 \pm \xi_{п} \cdot \tau, \quad (4)$$

где $Пр_0$ – значение параметра в момент времени $\tau = 0$; $\xi_{п}$ – скорость изменения параметра.

Таким образом, прогнозирование параметра в любой момент времени возможно если известны постоянные коэффициенты $Пр_0$ и $\xi_{п}$. Определение данных коэффициентов реализуется по результатам испытаний или эксплуатации.

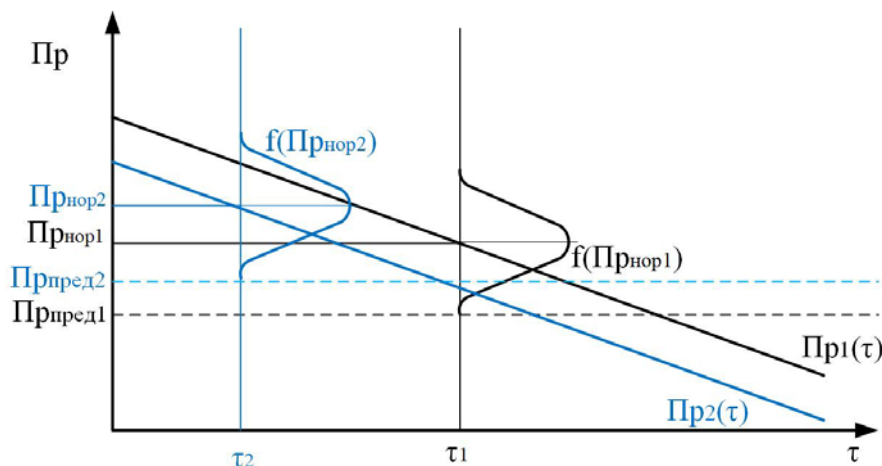


Рис. 3. Схема предотказного состояния контактной пары
Fig. 3. The scheme of the pre-failure state of the contact pair

Следует различать индивидуальное и вероятностное прогнозирование. При индивидуальном, по результатам кратковременных испытаний или эксплуатации одного изделия прогнозируется значение параметра или наработка до выхода параметра этого изделия за установленные пределы.

При вероятностном прогнозировании на основании некоторого количества одно-

типным изделий (выборки) возможно определение средней наработки, гамма-процентной наработки или вероятность выхода параметра за установленные пределы совокупности изделий данного типа (вероятность безотказной работы).

В этом случае состав исходных данных при индивидуальном и вероятностном прогнозировании параметра представлен в таблице.

Таблица

Исходные данные для прогнозирования значений параметра

Table

Initial data for predicting parameter values

Индивидуальное прогнозирование		Вероятностное прогнозирование	
Значение параметра в момент времени τ_1	$П1$	Среднее значение параметра в момент времени τ_1	$\bar{П}1$
Значение параметра в момент времени τ_2	$П2$	Среднее значение параметра в момент времени τ_2	$\bar{П}2$
Среднеквадратичное отклонение параметра	$\sigma_{п.и}$	Среднеквадратичное отклонение параметра	$\sigma_{п.в}$
$\tau_{пр}$ – время приработки (наработка); $\tau_{и}$ – время испытаний			

При индивидуальном прогнозировании определяется скорость измерения параметра $\xi_{п}$ и начальное приведенное значение параметра $Пр_0$

$$Пр_0 = \frac{П_1 + П_2 + \xi_{п} \cdot (\tau_1 + \tau_2)}{2}, \quad (5)$$

Далее следует определять среднюю наработку элемента пары до выхода его параметра за установленный предел $Пр_{пред}$ по формуле:

– при снижении параметра

$$\bar{T} = \frac{\tau_n \cdot (\overline{\text{Пр}_0} - \text{Пр}_{\text{пред}})}{\Pi_1 - \Pi_2}, \quad (6)$$

где $\bar{T}$ – средняя наработка до выхода параметра за установленный предел.

Тогда значение параметра в момент времени τ :

– при снижении параметра

$$\Pi(\tau) = \overline{\text{Пр}_0} - \xi_n \cdot \tau, \quad (7)$$

При вероятностном прогнозировании расчет вероятности невыхода параметра за установленный предел (вероятности безотказной работы) $\text{Пр}_{\text{пред}}$ оценивается по формуле:

– при снижении параметра

$$P(\tau) = F_0 \left(\frac{\overline{\text{Пр}_0} - \text{Пр}_{\text{пред}} - \xi_n \cdot \tau}{\sqrt{\sigma^2 + (\tau - \bar{\tau}_1)^2 \cdot \delta_{\xi}^2}} \right), \quad (8)$$

где F_0 – нормированная функция распределения при оценке меры рассеяния; σ – среднеквадратичное отклонение параметра; δ_{ξ} – коэффициент, характеризующий относительную ошибку в определении скорости изменения параметра: для индивидуального прогнозирования $\delta_{\xi, \text{и}} = 0,45$; для вероятностного – $\delta_{\xi, \text{в}} = 0,15$.

Средняя наработка до выхода параметра за установленный предел $\text{Пр}_{\text{пред}}$ определяется по формуле:

– при снижении параметра

Заключение

Реализация предлагаемой методики определения безотказности элементов контактных пар является многостадийным процессом. Теоретические принципы являются первым этапом в вопросе прогнозирования надежности контактных пар. Второй этап, требующий дальнейшей проработки, – построение фактических кривых изменения параметров технического состояния во времени. Данное обстоятельство

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Викторова, В.С. Модели и методы расчета технических систем / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. Изд. 2-е, испр. М.: Ленанд, 2016. 256 с.
2. Birolini, A. Reliability Engineering: Theory and Practice. 8th Edition. – Springer-Verlag GmbH, Deutschland, 2017. – 666 p. – ISBN: 3662542080.

$$\bar{T} = \frac{(\overline{\text{Пр}_0} - \text{Пр}_{\text{пред}})}{\xi_n}, \quad (9)$$

Гамма-процентная наработка определяется по формуле

$$T_{\gamma} = \bar{T} - \sigma \cdot u_p, \quad (10)$$

где u_p – квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности γ [13,14].

Соответственно отказ элементов пары наступает при выходе параметра за предельно допустимые значения. Следовательно, вероятность безотказной работы самой пары трения скольжения можно оценивать как произведение вероятностей безотказной работы по параметрам отдельных элементов (при указанном ранее допущении – все параметры независимы).

$$P_u(\tau) = \prod_1^r P_r(\tau), \quad (11)$$

где $P_u(\tau)$ – вероятность безотказной работы изделия по всем r параметрам элементов.

Получение фактической функциональной зависимости изменения начального значения параметра во времени, характеризующую скорость изменения параметра, позволяет прогнозировать показатели безотказности как структурных элементов, так и технической системы в целом.

ство определяет выбор материалов (с требуемыми физико-механическими свойствами) сопряженных элементов в заданных условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, что требует разработки испытательных стендов или полигонов. Третьим этапом является анализ и оценка результатов ускоренных испытаний.

3. Blokus, A. Multistate System Reliability with Dependencies. Academic Press, 2020. 292 p. ISBN: 978-0-12-821260-8.
4. Elsayed, A. Reliability Engineering. 3rd ed. — Wiley, 2020. — 919 p. — ISBN: 9781119665922
5. Jin, T. Reliability Engineering and Services. Wiley, 2019. 568 p. ISBN: 9781119167013

6. Ram, M., Davim J. (eds.) *Advances in Reliability and System Engineering*. Springay, 2017. — 265 p.
7. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейлор. М. Машиностроение. 1968, 543 с.
8. Сидоров, В.А. Развитие теории технической диагностики металлургических машин для обеспечения их безотказности: дис. д-ра техн. наук: 05.02.13. Донецк, 2016.
9. Александровская, Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: Учебник. М.: Логос, 2001.-208.: ил.
10. Дружинин, Г.В. Надежность автоматизированных систем, М., Энергия, 1977.

REFERENCES

1. Viktorova VS, Stepanyants AS. Models and methods of calculation of technical systems. Moscow: Lenand; 2016.
2. Birolini A. Reliability engineering: theory and practice. 8th ed. Germany: Springer-Verlag GmbH; 2017.
3. Blokus A. Multistate system reliability with dependencies. Academic Press; 2020.
4. Elsayed A. Reliability engineering. 3rd ed. Wiley; 2020.
5. Jin T. Reliability engineering and services. Wiley; 2019.
6. Ram M, Davim J. *Advances in reliability and system engineering*. Springay; 2017.
7. Bowden FP, Taylor M. Friction and lubrication of solids. Moscow: Mashinostroenie; 1968.
8. Sidorov VA. Development of technical diagnostics theory of metallurgical machines to ensure their reliability [dissertation] [Donetsk (RF)]; 2016.

Информация об авторе:

Романов Игорь Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические комплексы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, тел. 89249241303, Author-ID-РИНЦ 641517.

11. Проников, А. С. Надежность машин. М., Машиностроение, 1978.
12. Платонов, Г.Н. Параметрическая надежность кузнечно-прессового оборудования: Экспериментальный научно-исследовательский институт кузнечно-прессового машиностроения «Эникмаш», Воронеж, 1981.
13. Ганин, М.П. Таблицы для вероятностных и статистических расчетов. Военно-морская орденов Ленина, Октябрьской революции и Ушакова академия Маршала Советского Союза Греčko А.А., 1986, 289 с.
14. Губарев, В.В. Вероятностные модели: Справочник в 2-х частях. – Новосибирск: Новосибирский электротехн. ин-т, 1992. 200 с.

9. Aleksandrovskaya LN, Afanasyev AP, Lisov AA. Modern methods of ensuring the safety of complex technical systems: textbook. Moscow: Logos; 2001.
10. Druzhinin GV. Reliability of automated systems. Moscow: Energia; 1977.
11. Pronikov A S. Reliability of machines. Moscow: Mashinostroenie; 1978.
12. Platonov GN. Parametric reliability of forging and pressing equipment. Voronezh: Experimental Research Institute of Forging and Pressing Engineering *Enikmash*; 1981.
13. Ganin MP. Tables for probabilistic and statistical calculations. 1986.
14. Gubarev VV. Probabilistic models: handbook. Novosibirsk: Novosibirsk Electrotechnical Institute; 1992.

Romanov Igor Olegovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Complexes at Far Eastern State Transport University; phone: 89249241303; Author-ID-RSCI 641517.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 12.04.2024; принята к публикации 26.05.2024. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 03.04.2024; approved after review on 12.04.2024; accepted for publication on 26.05.2024. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.