

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-192; 621.8-1/-9; 620.178.4/.6

doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-4-10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ ПО ИХ РАБОТОСПОСОБНОМУ СОСТОЯНИЮ

Игорь Олегович Романов✉

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

Аннотация

Выполнение функционального назначения технической системой зависит от ее структурного состава и условий внешнего воздействия. Машиностроительная продукция представляет собой сложную техническую систему, состоящую из структурных элементов, взаимосвязанных по принципу иерархии (техническая система – структурная система – элемент).

Работоспособное состояние элементов определяется сохранением технических параметров в заданных пределах в течение назначенного интервала времени. В процессе эксплуатации под внешней нагрузкой сопряженные детали контактной пары имеют различные степени изменения технических параметров. В большинстве случаев ресурс одного из соприкасающихся элементов пары более низкий, что приводит к неоднократной его замене до полной выработки ресурса вторым элементом.

Потребителя, в первую очередь, интересует вопрос установления необходимо количества замен элементов. Решение указанной задачи возможно при установлении функциональных зависимостей изменения технических параметров во времени для каждого соприкасающегося элемента в контактной паре с учетом их фактических наработок до предотказного состояния.

Использование данного методического подхода позволяет спрогнозировать на этапе проектирования реализуемый уровень надежности элементов, контактной пары и технической системы в целом при дальнейшей эксплуатации машиностроительной продукции.

Ключевые слова: параметр, контактные пары, элемент, система, предотказное состояние, ресурс.

Ссылка для цитирования:

Романов И.О. Определение ресурса соприкасающихся элементов контактной пары по их работоспособному состоянию / И.О. Романов // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 7. – С. 4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-4-10.

Original article

Open Access Article

DETERMINATION OF THE ELEMENTS RESOURCE OF THE CONTACT PAIR ACCORDING TO THEIR WORKING CONDITION

Igor Olegovich Romanov✉

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

Abstract

Implementation of the functional purpose of a technical system depends on its structural composition and the conditions of external influence. Machine-building products are a complex technical system consisting of structural elements interconnected according to the principle of hierarchy (technical system – structural system – element).

The functional state of the elements is determined by maintaining the technical parameters within the specified limits during the given time interval. During operation under external load, the mating parts of the contact pair have different degrees of changing technical parameters. In most cases, the resource of one of the contacting elements of the pair is lower, which

leads to its repeated replacement until the resource is fully exhausted by the second element.

The consumer is primarily interested in the problem of determining the necessary number of element replacements. The solution of this problem is possible by finding out functional dependencies of changes in technical parameters over time for each mating element in the contact pair, taking into account their actual operating time up to the pre-failure state.

Reference for citing:

Romanov IO. Determination of the elements resource of the contact pair according to their working condition. Transport Engineering. 2024;7:4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-4-10.

Введение

Выполнение требуемых потребителю функций технической продукцией машиностроительного производства в течение времени, регламентированного в нормативной документации, зависит от работоспособного состояния ее структурных элементов (контактных пар, деталей). В процессе эксплуатации под воздействием внешних условий элементы контактных пар имеют различную степень изменения параметров технического состояния, которая определяет взаимодействие соприкасающихся рабочих поверхностей. Изменяются условия работы элементов и, как следствие, происходит их отказ. Характер отказа определяет условие неравнопрочности элементов, т.е. при отказе одного из них, другой имеет невыработанный ресурс, и требуется неоднократная замена отказавших элементов до полной выработки его ресурса, что отражается на общей эффективности использования технической системы.

Изделия машиностроения представляют собой сложную техническую систему, имеющую многоуровневую структуру, состоящую из взаимосвязанных элементов, образующих самостоятельные системы. Одной из таких систем являются узлы и агрегаты, элементы которых работают в условиях трения скольжения при периодических ударных воздействиях. Изнашивание поверхностных слоев соприкасающихся элементов контактной пары под указанными силовыми воздействиями прежде всего определяет условия контактирования и может варьироваться в пределах полно-

The use of this methodological approach makes it possible to predict at the design stage the realized level of reliability of the elements, of the contact pair and of the technical system as a whole during further operation of machine-building products.

Keywords: parameter, contact pairs, element, system, pre-failure condition, resource.

го, 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. Например, в работе контактной пары фрикционных поглощающих аппаратов подвижного состава "подвижная пластина – корпус" происходит уменьшение толщины стенки корпуса и сечения пластины в зоне трения. До полной реализации ресурса корпуса происходит неоднократная замена подвижных пластин. Для оценки эффективности, в том числе экономической, связанной с простоем подвижного состава на замену поглощающих аппаратов, потребителя, в первую очередь, интересует наработка на отказ каждого элемента.

Решение задачи установления необходимой наработки на отказ имеет множество вариантов, большая часть из них базируется на статистической информации, полученной в процессе эксплуатации указанных технических систем. Подобные подходы не позволяют установить работоспособность, характеризуемую параметрами технического состояния, каждого сопряженного элемента рассматриваемой пары в заданный момент времени.

Определение предотказного состояния сопряженных элементов контактной пары

В эксплуатации соприкасающиеся элементы контактной пары имеют различные за-

коны изменения технического состояния. Для элементов контактных пар, работаю-

щих в условиях трения скольжения с периодическими ударными воздействиями закон изменения параметров технического состояния, характеризуемый скоростью изменения геометрических размеров, может быть аппроксимирован линейной, сте-

пенной, экспоненциальной и др. зависимостями. При изучении функциональной зависимости следует определить значение параметра элемента, соответствующее предельному состоянию, превышение которого определяет его отказ (рис. 1).

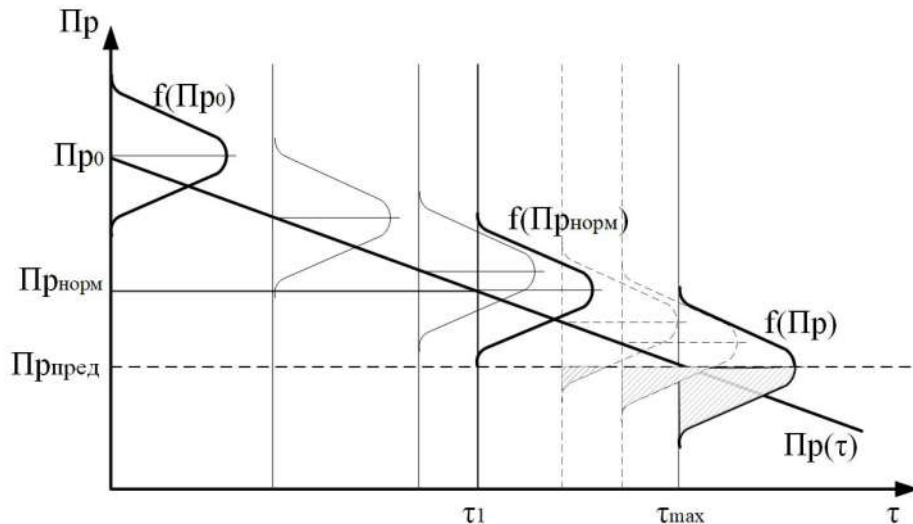


Рис. 1. Закон изменения параметров технического состояния

Pr_0 – начальное значение параметра; $Pr(\tau)$ – функциональная зависимость, характеризующая скорость изменения начального параметра во времени τ ; τ_1 – предотказная наработка, соответствующая нормированному значению параметра; τ_{max} – предельная наработка; $f(Pr)$ – случайные изменения параметра; заштрихованная область – вероятность появления отказа

Fig. 1. Law of changing the parameters of the technical condition

Pr_0 is the initial value of the parameter; $Pr(\tau)$ is a functional dependence characterizing the rate of changing the initial parameter over time τ ; τ_1 is the pre-failure operating time corresponding to the normalized value of the parameter; τ_{max} is the maximum operating time; $f(Pr)$ is random parameter changes; shaded area is the probability of failure

По полученным зависимостям становится возможным определение предотказного состояния одного из элементов контактной пары. Для определения нормы на предотказное состояние соприкасающегося элемента, с учетом его неоднократной замены, введем следующие понятия и допущения.

Элемент в контактной паре, имеющий большую наработку до предотказного состояния принимается за базовый, с индексом 1; элемент в контактной паре, имеющий меньшую наработку, обозначен как сопряженный с индексом 2; наработка базового элемента до предотказного состояния принимается за ресурс пары; наработка сопряженного элемента до предотказного состояния принимается за его ресурс.

В этом случае, если за время оценки взять ресурс базового элемента τ_1 , то за оценку ресурса второго элемента, можно принять соотношение

$$K_{нар_2} = \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad (1)$$

где $K_{нар_2}$ – коэффициент показателя наработки сопряженного элемента (далее – показатель наработки); τ_1 – наработка до предотказного состояния базового элемента; τ_2 – наработка до предотказного состояния сопряженного элемента первой установки.

С физической точки зрения показатель наработки показывает какая часть ресурса пары реализуется сопряженным элементом при первой установке. По значению показателя наработки сопряженные элементы можно разделить на три группы:

– долговечные $K_{\text{нар}_2} \gg 1$, в этом случае сопряженный элемент определяется, как базовый и дальнейшие расчеты следует вести относительно его ресурса (наработки на предотказное состояние);

– определяющие ресурс контактной пары $K_{\text{нар}_2} \cong 1$, в этом случае наблюдается принцип равнопрочности, что подразумевает идентичные функции изменения па-

раметров технического состояния элементов;

– недолговечные $K_{\text{нар}_2} \ll 1$, определяющие ресурс сопряженного элемента.

Для полной реализации ресурса τ_1 в процессе эксплуатации проводится периодическая замена отказавших сопряженных элементов, рис. 2.

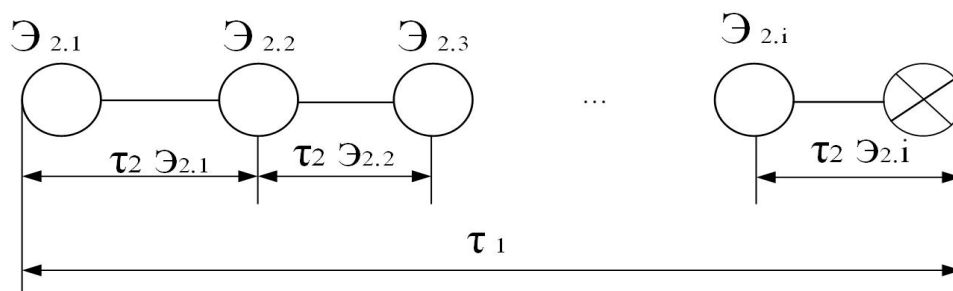


Рис. 2. Схема реализации ресурса базового элемента при i -кратной замены отказавшего сопряженного элемента новым $\mathcal{E}_{2,i}$ – сопряженный элемент i -ой установки; i – индекс устанавливаемого нового элемента; $\tau_2 \cdot \mathcal{E}_{2,i}$ – ресурс сопряженного элемента i -ой установки; τ_1 – ресурс базового элемента

Fig. 2. Diagram of implementing the resource of the basic element with i -fold replacement of the failed contact element with a new one $\mathcal{E}_{2,i}$ is the contact element of i -installation; i is the index of a new element being installed; $\tau_2 \mathcal{E}_{2,i}$ is the resource of the contact element of i -installation; τ_1 is the resource of the base element

При замене элемента в паре в изменившихся условиях происходит повторная приработка рабочих поверхностей, а также, вследствие изменения параметров базового элемента, ресурс повторно устанавливаемого сопряженного элемента, как правило, меньше ресурса первоначально устанавливаемого элемента.

$$\tau_{2\mathcal{E}_{2,2}} = \gamma \tau_{2\mathcal{E}_{2,1}}, \quad (2)$$

где $\tau_{2\mathcal{E}_{2,2}}$ – наработка на предотказное состояние элемента второй установки; $\tau_{2\mathcal{E}_{2,1}}$ – наработка на предотказное состояние первоначально установленного сопряженного элемента; γ – коэффициент изменения ресурса.

При третьей установке

$$\tau_{2\mathcal{E}_{2,3}} = \gamma \tau_{2\mathcal{E}_{2,2}} = \gamma^2 \tau_{2\mathcal{E}_{2,1}}, \quad (3)$$

Аналогично для i -ой установки

$$\tau_{2\mathcal{E}_{2,i}} = \gamma^{i-1} \tau_{2\mathcal{E}_{2,1}}, \quad (4)$$

где $\tau_{2\mathcal{E}_{2,i}}$ – наработка на предотказное состояние детали i -ой установки.

В соответствии с формулой (1) показатель наработки детали i -ой установки определяется отношением

$$K_{\text{нар}_2 i} = \frac{\tau_{2\mathcal{E}_{2,i}}}{\tau_1}, \quad (5)$$

После замены $\tau_{2\mathcal{E}_{2,i}}$ получим

$$K_{\text{нар}_2 i} = \gamma^{i-1} K_{\text{нар}_2 1}, \quad (6)$$

где $K_{\text{нар}_2 i}$ – показатель наработки по предотказного состояния сопряженного элемента i -ой установки; $K_{\text{нар}_2 1}$ – показатель наработки по предотказного состояния сопряженного первоначально установленного элемента.

Для полной реализации ресурса пары необходимо выполнение условия

$$K_{\text{нар}_2 1} + \gamma \cdot K_{\text{нар}_2 1} + \dots + \gamma^{n_0-1} \cdot K_{\text{нар}_2 1} = 1, \quad (7)$$

где n_0 – общее число установок сопряженных элементов при полной реализации ресурса пары.

Левая часть уравнения (7) является суммой геометрической прогрессии, т.е.

$$K_{\text{нар}_2 1} \left(\frac{1 - \gamma^{n_0}}{1 - \gamma} \right) = 1, \quad (8)$$

Решаем уравнение (8) относительно числа общих установок сопряженных элементов при реализации ресурса пары

$$K_{\text{нар}_2 1} - K_{\text{нар}_2 1} \gamma^{n_0} = 1 - \gamma$$

или

$$K_{\text{нар}_2 1} \gamma^{n_0} = K_{\text{нар}_2 1} - 1 + \gamma,$$

или

$$\gamma^{n_0} = \frac{K_{\text{нар}_2 1} + \gamma - 1}{K_{\text{нар}_2 1}}$$

После логарифмирования имеем

$$n_0 \ln \gamma = \ln \frac{K_{\text{нар}_2 1} + \gamma - 1}{K_{\text{нар}_2 1}},$$

окончательно

$$n_0 = \frac{\ln \frac{K_{\text{нар}_2 1} + \gamma - 1}{K_{\text{нар}_2 1}}}{\ln \gamma} \quad (9)$$

Средний расчетный показатель наработки сопряженных элементов $\bar{K}_{\text{нар}_2 1}$ на предотказное состояние определяется обратной величиной общего числа устано-

вок сопряженных элементов в пару при реализации ее ресурса.

$$\bar{K}_{\text{нар}_2 1} = \frac{1}{n_0} \quad (10)$$

Если общее число установок деталей не целое число, то его следует округлить до целого большего числа, так как часть элемента невозможно установить в пару при реализации ее ресурса.

Анализ формулы (9) показывает, что необходимым условием конечного числа замен детали является соблюдение неравенства

$$\gamma > 1 - K_{\text{нар}_2 1} \quad (11)$$

При не выполнении условия (10) общее число установок сопряженных элементов стремиться к бесконечности, а средний показатель наработки сопряженного элемента к нулю.

Номограмма зависимости наработки сопряженных элементов $\bar{K}_{\text{нар}_2 1}$ на предотказное состояние от аналогичной наработки первоначально установленного элемента и коэффициента изменения ресурса показана на рис. 3.

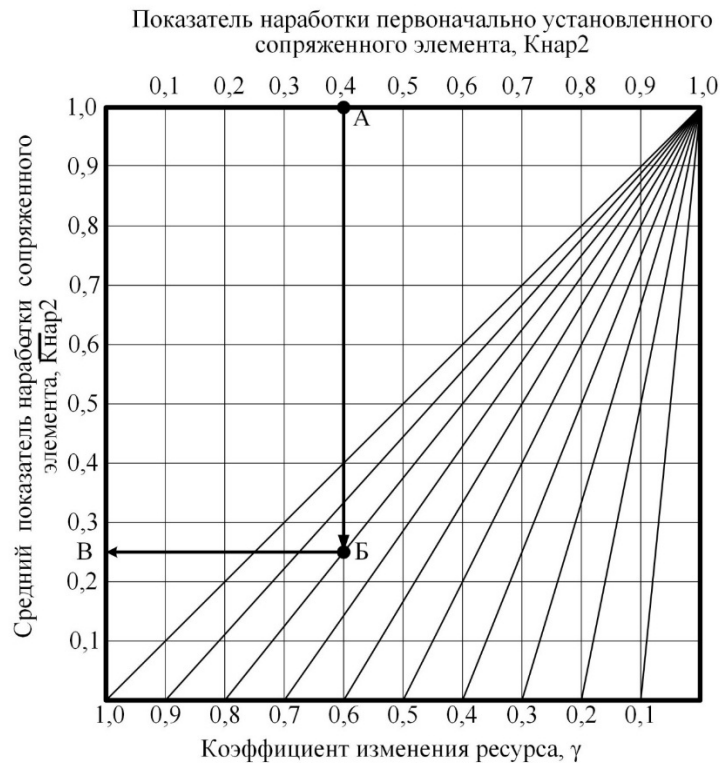


Рис. 3. Номограмма зависимости среднего показателя наработки на предотказное состояние сопряженного элемента от показателя наработки первоначально установленного сопряженного элемента и коэффициента изменения ресурса
Fig.3. Nomogram of the dependence of the average operating time on the pre-failure state of the conjugate element on the operating time of the initially installed conjugate element and the coefficient of resource change

Для определения расчетного среднего показателя наработки используется последовательность $A \rightarrow B \rightarrow B$.

Средний расчетный показатель наработки сопряженных элементов $\bar{K}_{нар2,1}$ на предотказное состояние можно также принять как соотношение

$$\bar{K}_{нар2,1} = \frac{\tau_{2cp}}{\tau_1}, \quad (12)$$

где τ_{2cp} – средняя наработка до предотказного состояния сопряженного элемента.

Имея функциональную зависимость изменения технического состояния сопряженного элемента во времени, появляется возможность определения нормы на показатель, характеризующий предотказное состояние, с учетом общего числа замен сопряженного элемента до полной выработки ресурса базового элемента (рис. 4).

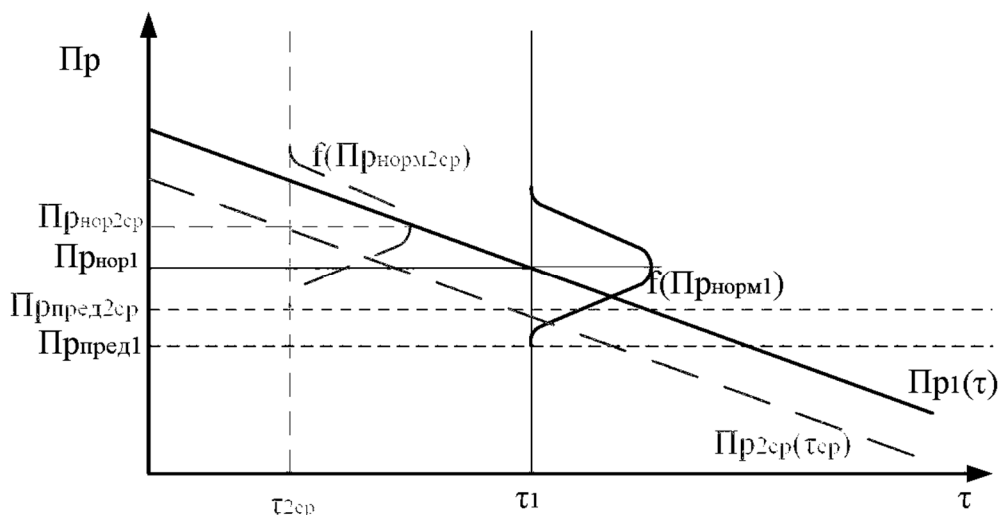


Рис. 4. Назначение средней нормы параметра предотказного состояния сопряженного элемента
Fig.4. Assignment of the average norm of the parameter of the pre-failure state of the conjugate element

В случае соблюдения принципа равнопрочности нормативные значения параметра предотказного состояния для сопряженного элемента выбираются по наработ-

ке базового элемента. В эксплуатации фактическая средняя наработка до предотказного состояния всегда меньше расчетной.

Заключение

Оценка изменения параметров технического состояния элементов контактной пары во времени с учетом их ресурса с последующим назначением норм является первым этапом определения средней наработки элементов, характеризующей их безотказность. Не менее важным вопросом

при определении общего показателя надежности пары в целом на этапе проектирования является формулирование требований качества к материалам соприкасающихся рабочих поверхностей элементов пары с использованием принципа равнопрочности деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александровская, Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: Учебник. /Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов. М.: Логос, 2001, 208 с. : ил.
2. Анцупов, А.В. Методология прогнозирования надежности элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл),

- В.П. Анцупов – Текст : непосредственный //Надежность. 2013, № 3 (46). С.5-14.
3. Беляев, Ю.К. Надежность технических систем. Справочник / Ю.К. Беляев, под редакцией И.А. Ушакова. М: Радио и связь, 1985, 606 с.
4. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. М. Мир, 1980, 612 с.

5. Надежность машин: справочник под ред. Б.Е. Бердичевского. М.: Изд-во «МИР», 1970, 304с., с ил.
6. Половко, А.М. Основы надежности / А.М. Половко, С.М. Гуров. BHV: С-Петербург, 2006, 560 с.
7. Проников, А.С. Надежность машин/ А.С. Проников. М.: Машиностроение, 1978, 592 с.
8. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин/ А.С. Проников. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 560 с.
9. Сидоров, В.А. Развитие теории технической диагностики металлургических машин для обеспечения их безотказности: диссертация на

соискание ученой степени доктора технических наук: 05.02.13 /Сидоров Владимир Анатольевич; Донецкий национальный технический университет. Донецк, 2016. – 382 с. : ил. Библиограф.: с. 321 – 356. – Место защиты: Донецкий национальный технический университет. – Текст : непосредственный.

10. Стрельцов, А.С. Система оценок показателей надежности машин и диагностики экономической целесообразности восстановления и упрочнения деталей машины/ А.С. Стрельцов, И.О. Романов. – Текст : непосредственный// Сварка и Диагностика. 2016, № 5 (59), 2016. С.-30-35.

REFERENCES

1. Aleksandrovskaya LN, Afanasyev AP, Lisov AA. Modern methods of ensuring reliability of complex technical systems: textbook. Moscow: Logos; 2001.
2. Antsupov AV, Antsupov AV, Antsupov VP. Methodology to forecast the reliability of machine elements according to various criteria. Dependability. 2013;3(46):5-14.
3. Belyaev YuK. Reliability of technical system: handbook. Moscow: Radio I Svyaz; 1985.
4. Johnson N, Lion F. Statistics and experimental planning in engineering and science. Moscow: Mir; 1980.
5. Berdichevsky BE, editor. Reliability of machines: handbook. Moscow: Mir; 1970.
6. Polovko AM, Gurov SM. Fundamentals of reliability. St. Petersburg: BHV; 2006.

7. Pronikov AS. Reliability of machines. Moscow: Mashinostroenie; 1978.
8. Pronikov AS. Parametric reliability of machines. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University; 2002.
9. Sidorov VA. Development of the theory of technical diagnostics of metallurgical machines to ensure their reliability [dissertation]. [Donetsk]: Donetsk National Technical University; 2016.
10. Streltsov AS, Romanov IO. A system for evaluating machine reliability indicators and diagnosing the economic feasibility to restore and strengthen machine parts. Svarka i Diagnostika. 2016;5(59):30-35.

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.

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 26.04.2024; одобрена после рецензирования 26.04.2024; принята к публикации 26.06.2024. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 26.04.2024; approved after review on 26.04.2024; accepted for publication on 26.06.2024. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.