

# Оценка оптимальной длины реализации случайного нагружения при исследовании долговечности деталей машин

## Estimating the optimal duration of random loading as part of machine part durability research

Гадолина И.В.  
Irina V. Gadolina

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Российская Федерация  
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russian Federation  
[gadolina@mail.ru](mailto:gadolina@mail.ru)



Гадолина И.В.

**Резюме. Цель.** Для принятия обоснованного решения о долговечности деталей машин необходимо владеть информацией об эксплуатационной нагрузке, которую требуется за- мерить на представительном участке пути. При этом он не должен быть слишком боль- шим. Таким образом, требуется определить оптимальную продолжительность реализа- ции. Оптимальная с точки зрения надежности регистрации нагрузки длина реализации определяется для стационарного в специальном смысле процесса. Стационарность в специальном смысле определяется конкретно для задачи оценки долговечности кон- кретной детали. **Методы.** Применение спектральной теории исследования случайных процессов, вероятно, не лучший способ для рассмотрения нестационарных процессов нагружения применительно к задаче оценки долговечности. В качестве оптимального решения считаем применение процедуры подсчета циклов (метод дождевого потока) с последующим расчетом долговечности. Сформулирована лемма и теорема о достаточ- ной длине реализации для стационарного в специальном смысле процесса. Достаточная длина реализации определяется как предел, при котором ее увеличение не приведет к заметному изменению вычисленной долговечности. **Результаты.** Вопросы о стационар- ности процесса в узком смысле и о необходимой продолжительности реализации по- могут в планировании эксплуатационных испытаний по замеру и регистрации случайных процессов нагружения деталей машин. Оба эти вопроса рассмотрены с точки зрения накопления усталостных повреждений с использованием линейной гипотезы суммирова- ния Майнера, а также скорректированной линейной гипотезы суммирования повреждений и с учетом параметра наклона кривой усталости  $m$ . Рассмотрены некоторые практиче- ские инженерные задачи: задача об оптимальной длине реализации майнинговой горной машины, процесс нагружения которой характеризуется высокой степенью нерегуляр- ности и задача определения необходимой длины реализации регистрации нагрузок в детали подвижного состава. **Заключение.** Сформулирована теорема о необходимой и достаточной длине реализации. Для апробирования метода были использованы модель- ные процессы, сформированные на основании марковских матриц переходов. Помимо этого, метод и теорема были апробированы на примерах некоторых опытных процессов, полученных из эксплуатационных испытаний транспортных и технологических машин.

**Abstract. Aim.** Making an informed decision regarding the durability of machine parts requires information on the operational load that needs to be measured on a representative section of the track. It should not be too long as well. Thus, it is required to determine the optimal duration of implementation. The duration of implementation that is optimal in terms of the reliability of load registration is defined for a process that is stationary in a special sense. Stationarity in a special sense is defined specifically for the task of assessing the durability of a specific part. **Methods.** The use of spectral theory for the study of random processes is probably not the best way of examining non-stationary loading processes in the context of durability assessment. We believe it would be optimal to use a cycle counting procedure (rain flow method) with subsequent calculation of durability. A lemma and a theorem were formulated on the sufficient duration of implementation for a process that is stationary in a special sense. A sufficient duration of implementation is defined as a limit past which its increase will not lead to a noticeable change in the calculated durability. **Results.** The matters of stationarity of a process in a narrow sense and the required duration of implementation will help in planning operational tests to measure and record random processes of machine part loading. Both matters were examined in terms of fatigue damage accumulation using Miner linear damage rule, as well as the adjusted

*linear damage summation hypothesis taking into account the fatigue curve slope parameter  $m$ . Some practical engineering problems were examined, including the problem of the optimal duration of implementation of a mining machine whose loading process is characterized by a high degree of irregularity and the problem of finding the required duration of implementation of load recording in a rolling stock component. **Conclusion.** A theorem on the required and sufficient duration of implementation was formulated. In order to test the method, Markov transition matrix-based model processes were used. In addition, the method and theorem were tested using examples of some experimental processes obtained from operational tests of vehicles and production machines.*

**Ключевые слова:** усталость металла, случайные процессы, длина реализации, схематизация, стационарные процессы, накопление повреждений.

**Keywords:** metal fatigue, random processes, duration of implementation, cycle counting, stationary processes, damage accumulation.

**Для цитирования:** Гадолина И.В. Оценка оптимальной длины реализации случайного нагружения при исследовании долговечности деталей машин // Надежность. 2024. №1. С. 51-57. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-51-57>

**For citation:** Gadolina I.V. Estimating the optimal duration of random loading as part of machine part durability research. Dependability 2024;1: 51-57. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-51-57>

**Поступила:** 13.08.2023 / **После доработки:** 16.01.2024 / **К печати:** 15.03.2024

**Received on:** 13.08.2023 / **Revised on:** 16.01.2024 / **For printing:** 15.03.2024

## Введение

Для оценки ресурса деталей машин и принятия обоснованного решения о надежности их работы необходимо иметь [1]: 1) данные о характеристиках сопротивления усталости; 2) данные об истории нагружения деталей машин; 3) гипотезу накопления повреждений при нерегулярном нагружении. Данные о характеристиках сопротивления усталости в виде кривой усталости обычно получают при испытаниях при нагружении постоянной амплитудой или путем пересчета по данным испытаний при нерегулярном нагружении, производимого по разработанной нами методике [2]. Наиболее часто используемая гипотеза накопления повреждений – линейная (мы также можем порекомендовать скорректированную линейную гипотезу [1] – процедура будет похожей). Для применения линейной гипотезы к случайному нагружению необходимо применить методы схематизации нагружения [3–5], преобразующие случайные процессы в распределение циклов с постоянными амплитудами, так называемые спектры нагружения  $(\sigma_{ai}, n_i)$ , где  $\sigma_{ai}$  – значения амплитуд напряжений и  $n_i$  – числа их повторений. Также проводятся исследования по рассмотрению случайного процесса нагружения в частотной области. Такой подход может быть рекомендован на этапе проектирования [1]. В качестве одного из недостатков этого метода этого следует назвать за редким исключением независимость усталостных свойств от частоты нагружения.

В настоящее время существует как минимум два подхода к анализу нагружения машин во временной области: 1) анализ отдельных режимов при различных режимах работы и составление блока нагружения с учетом доли работы в этих режимах; 2) глобальная регистрация нагрузки при длительной эксплуатации.

Последний подход оказался технически осуществимым при использовании микропроцессоров. В обоих случаях возникает вопрос о стационарности процесса нагружения.

Определение свойства стационарности случайного процесса в широком смысле дал Александр Хинчин [6]. Определение гласит о том, что случайная функция является стационарной, если ее средние значения, а также дисперсия стабильны, а функция автокорреляции зависит только от разности времен, за которую взяты ординаты случайной функции. К сожалению, это определение мало что дает для оценки нагрузочных характеристик, связанных с оценкой долговечности. Также ничего не сказано о требуемой продолжительности реализации. Какова достаточная продолжительность реализации? Стандарт [3] утверждает, что достаточно 1000 экстремумов. Мы могли бы спросить: какие именно экстремумы? Метод «Беговая дорожка», специальный метод фильтрации процессов случайной нагрузки, позволяет сократить количество процессов с 5487 экстремумов до 274 (осталось всего около 5% экстремумов) [7]. Как ни покажется парадоксально, но долговечность, выраженная в количестве блоков до отказа, заметно не меняется, как теоретически, так и при определении опытным путем.

В статье [8] продемонстрировано, что длина реализации совпадения оказывает существенное, надежное и значимое влияние на поведение в социологии и многих других предметах. В [9] применен математический аппарат теории случайных функций для описания математической модели экстраполятора теории импульсных систем. Получены расчетные соотношения оценок погрешностей прогноза. Получены рекомендации, позволяющие выбрать число точек измерения. В работе [10] проведен учет индивидуальных особенностей нагру-

жения силовых элементов конструкции транспортных самолетов что позволяет значительно продлить ресурс, в некоторых случаях – в два и более раз. Реализация известных подходов, разрабатываемых для мониторинга и анализа нагрузок, требует значительных изменений в программах и процедурах поддержания летной годности, включая необходимость. В работе [10] рассматривается подход без установки дополнительного сложного измерительного оборудования. На основе применения технологий искусственного интеллекта предложена методика прогноза нагрузок в силовых элементах конструкции самолета.

## 1. Теория

Нагрузочные процессы работающих машин в большинстве случаев представляют собой случайные процессы, часто нестационарные.

Хорошо известно, что статистические параметры случайного процесса (среднее значение, дисперсия и спектральная плотность) существенно не коррелируют с накоплением усталостных повреждений. Основным инструментом изучения нагруженности в связи с этим остается тензометрирование с последующей обработкой по методу дождя [3–5]. На основе решений обратных задач экспериментальной механики в работе [11] приведены результаты косвенных методов определения деформаций в опасных точках конструкции. По результатам тензометрирования обычно осуществляется представительная свертка процесса, которая представляет собой распределение амплитуд полных циклов. Метод дождя является наиболее часто используемым методом подсчета циклов [3–5, 7]. Тот факт, что усталость зависит от интервалов между экстремумами процесса, требует замены исходного непрерывного процесса последовательностью экстремумов (временные интервалы между ними значения не имеют). Поскольку это распределение является лишь исходным элементом для оценки ресурса машин, то это последнее и выбрано в качестве основного критерия, по которому можно принять решение о требуемой длине реализации.

Если длина реализации стационарного в специальном смысле процесса достаточно велика, случайные эффекты усредняются и расчетный срок службы машин стабилизируется. С другой стороны, если реализация стационарного в специальном смысле случайного процесса непродолжительна, возникают значительные флуктуации расчетного времени жизни из-за флуктуаций результирующих спектров нагружения. Чем дольше реализация, тем меньше колебания. В работе [12] рассматривается минимальная длина зависимости в рейтинге реализаций.

Здесь мы определяем необходимую и достаточную длину реализации  $L_{NS}$  как период, при увеличении которого не происходит существенного изменения расчетного срока службы. Если  $R_{\infty}$  – время жизни, оцененное

на основе очень долгой реализации, скажем, 100 000 экстремумов, то мы определяем относительное время жизни как  $R^*(L)/R_{\infty}$ . Здесь  $R^*(L)$  – расчетное время жизни при конечной длине реализации  $L$ .

### Лемма

При увеличении длины реализации стационарного в специальном смысле случайного процесса существует предел:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{R^*(L)}{R_{\infty}} = 1. \quad (1)$$

Процесс, для которого существуют предел (1) назовем стационарным в специальном смысле процессом.

### Теорема

Можно утверждать, что существует значение  $L = L_{NS}$ , для которого выполняется условие:

$$\left| \frac{R^*(L)}{R_{\infty}} - 1 \right| < 0,05. \quad (2)$$

Следовательно, мы определяем  $L_{NS}$  как необходимую и достаточную длину реализации.

Долговечность  $R$  рассчитывается по скорректированной линейной гипотезе [1] с приведением амплитуд напряжений  $\sigma_a$  к эквивалентным с учетом средних значений циклов  $\sigma_m$ . Распределения амплитуд напряжений  $\sigma_a$  и средних значений  $\sigma_m$  являются результатом двухпараметрической схематизации. В настоящее время считается, что лучшим методом подсчета циклов является двухпараметрический метод подсчета циклов дождевого стока [3–5]. Использовался алгоритм трех экстремумов с программой, написанной на языке программирования R [13]. Для сравнения результатов также использовалась программа, написанная Томасом Ирвином на C++ [14]. Результаты почти такие же. Алгоритмы позволяют обновлять оценку по мере поступления информации о нагрузке во время операции, другими словами, вести обработку в режиме реального времени.

## 2. Метод

Метод основан на оценке времени жизни для реализаций различной длины. Упрощенная скорректированная линейная гипотеза [15] основана на оценке усталостного повреждения  $d$  в течение одного блока нагружения  $l_b$ . Применим правило линейного суммирования повреждений:

$$d = \sum n_i / N_i, \quad (3)$$

где  $n_i$  – количество циклов в блоке с амплитудой  $\sigma_{ai}$ , а  $N_i(\sigma_{ai})$  – число предельных циклов, оцениваемое по уравнению кривой усталости [1]:

$$\lg(N_i) = A - m \lg(\sigma_{ai}). \quad (4)$$

Согласно упрощенной скорректированной линейной гипотезе [15] предельное событие (отказ) в среднем будет достигнуто при

$$D = \sum d = 0,25. \quad (5)$$

Последнее уравнение служит для оценки  $\lambda$  – среднего количества блоков до отказа и оценки срока службы:

$$L = \lambda l_b, \quad (6)$$

где  $l_b$  – длина блока нагружения.

Чтобы применить предложенный метод, мы увеличиваем шаг  $\lambda$  за шагом до того, как оно будет удовлетворять (2), и таким образом мы оцениваем достаточную длину реализации как  $L = L_{NS}$ .

### 3. Смоделированные процессы и их анализ

Для апробации разработанного метода были применены случайные последовательности, смоделированные по [16], метод, разработанный для моделирования

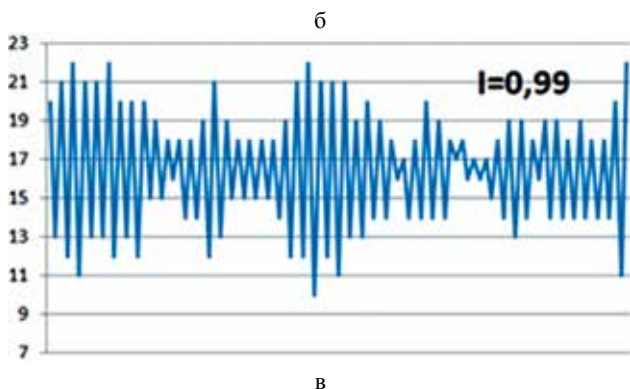
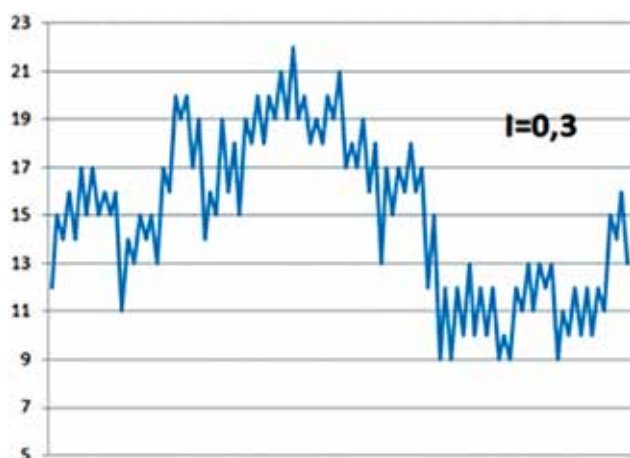


Рис. 1. Случайные процессы, моделируемые по марковским матрицам переходов [16]

процессов с различной степенью нерегулярности, а именно,  $I = 0,3$ ;  $I = 0,7$  и  $I = 0,99$ . Здесь  $I$  – коэффициент нерегулярности процессов и равен

$$I = N_0/N_e. \quad (7)$$

В (7)  $N_0$  – количество пересечений среднего уровня, а  $N_e$  – количество экстремумов, измеренных на репрезентативном периоде эксплуатационной нагрузки. На рис. 1 показаны три примера реализации, смоделированные по методу, описанному в [16]. Они представляют собой спектр случайных последовательностей и широко используются в академических исследованиях. Здесь они использовались для апробации разработанной методики.

Для апробации разработанного метода анализа достаточной длины реализации использовались процессы, аналогичные изображенным на рис. 1. Длина моделировалась до 10 000 экстремумов (5000 циклов). Для оценки срока службы использовался показатель угла наклона кривой усталости  $m = 7$ . Зависимости относительных времен жизни от длины реализации, выраженные в числе экстремумов, для трех процессов представлены на рис. 2. На рис. 2 видно, что значение 5000 экстремумов представляется достаточным для процессов  $I = 0,3$  и  $I = 0,7$ . С другой стороны, для процесса  $I = 0,99$  нам нужно около 7500 экстремумов. Этот факт можно объяснить значительной флуктуацией амплитуды этого процесса (см. рис. 1, в).



Рис. 2. Стабилизация вычисленной относительной долговечности с увеличением длины реализации для процессов, показанных на рис. 1 (а–в)

### 4. Практическое применение для задач деталей машин

**Нагрузка деталей экскаватора.** Рассмотрена оценка достаточной длины реализации для задачи нагружения деталей механического экскаватора «ЭКГ-12» [17]. В этом случае рассматривалась загрузка майнинговой машины. Из-за ряда случайных воздействий (неровности горных пород, изменение скорости) процессы носят крайне неравномерный характер. Исследован пример реализации, зафиксированный во время службы на месторождении «Кедровский» (Россия, Сибирь) [17]. Процесс был близок к узкополосному, так как коэффициент неравномерности

составлял примерно  $I = 0,89$ . Эффективная частота составляет 1,8 Гц. Для этого конкретного процесса среднее значение составляет 1,51 МПа, стандартное отклонение составляет около 11,94 МПа. Среднее значение оценивается по реализации, записанной в эксплуатации (в [18] приведены подробные рассуждения о природе усреднения детерминированных и случайных величин). Максимальная амплитуда нагружения в нашей задаче 46 МПа. Для оценки необходимой и достаточной длины реализации в этом случае мы провели моделирование для значений  $m = 3, 5$  и  $7$ . Мы варьируем здесь показатель усталости  $m$ , поскольку не располагаем точной информацией о значении этой величины. График относительных оценок долговечностей  $R^*/R$  с использованием скорректированной линейной гипотезы [1] представлен на рис. 3.

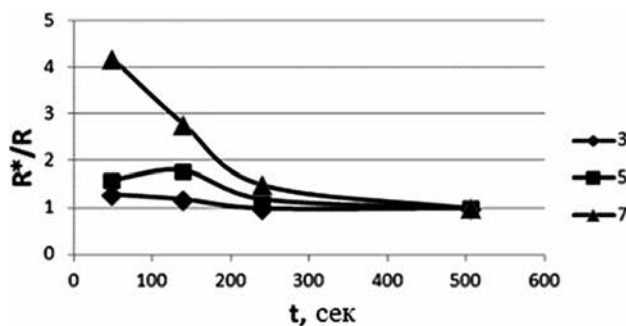


Рис. 3. Достаточная длина реализации для оценки долговечности детали механического экскаватора в зависимости от коэффициента угла наклона кривой усталости  $m$

Из рис. 3 видно, что длины реализации около 240 секунд (4 минуты) достаточно для надежной оценки долговечности. Для деталей с меньшим  $m$  достаточная длина реализации может быть даже меньше продолжительности 120 с, поскольку в этом случае наклон кривой усталости меньше.

**Нагрузка рамы тележки вагона.** Проблема надежности рамы тележки вагона весьма актуальна в железнодорожном машиностроении. Поэтому существенной является оценка нагрузки в динамике [19]. В работе [20] прочность детали оценивалась на стадии развития трещины и был проведен анализ возможности использования известной обобщенной модели Уилленборга для моделирования процесса развития усталостных трещин в стали 20ГФЛ при гармоническом нагружении с включением растягивающих перегрузочных циклов. При этом величины перегрузок выбирались наиболее вероятные для эксплуатационных железнодорожных спектров.

В настоящей работе регистрацию случайных процессов нагружения в наиболее напряженной точке проводили при различных скоростях. Для анализа устойчивости процессов была взята реализация со скоростью 44 км/ч. На рис. 4 показаны зависимости максимального (max), минимального (min) и размаха (Range) значений реализации процесса в зависимости от длины реализации. Последнее значение (размах) обратно коррелирует с

предполагаемым сроком службы: чем больше размах, тем меньше расчетный срок службы. На рис. 4 видно, что стабилизация этих характеристик достигается при длительности реализации  $t$  более 15 с.

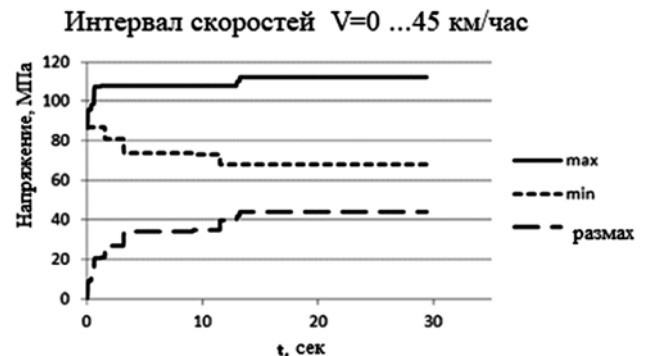


Рис. 4. Стабилизация во времени интегральных характеристик процесса нагружения железнодорожной детали

Для оценки срока службы был построен блок нагружения по эмпирическим данным распределения пробега с соответствующими скоростями. Эти данные представлены в [19]. В этой задаче показатель усталости известен из эксперимента и равен 4,  $m = 4$ . На основе этого показателя и на основе скорректированной линейной гипотезы оценивалось относительное время жизни для различных скоростей. По предложенному методу была оценена достаточная длина реализаций. График представлен на рис. 5, где видно, что для всех трех режимов эксплуатации достаточно продолжительности реализации около 20 сек. С другой стороны, это неверно для нестационарных в узком смысле процессов.

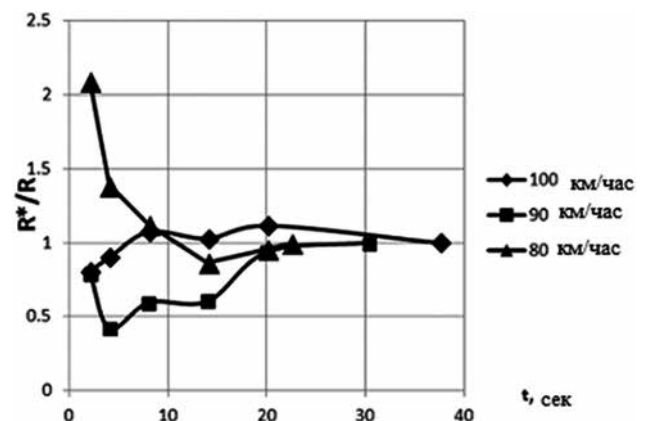


Рис. 5. Достаточная длина реализации процесса нагружения рамы тележки вагона в зависимости от различных режимов эксплуатации

## Выводы

Разработан метод оценки достаточной длины реализации. Это позволяет выбрать необходимую и достаточную длину реализации для оценки долговечности. Это также позволяет принять решение о стационарности

процесса в специальном смысле для оценки долговечности. Метод апробирован на примерах некоторых смоделированных и опытных процессов. Были также представлены некоторые практические приложения.

## Благодарности

Работа профинансирована за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>

## Библиографический список

1. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжении переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.
2. Гадолина И.В. Пересмотр роли испытаний при нерегулярном нагружении при получении научных выводов о пределе выносливости // *Надежность*. 2023. № 3. С. 23-27.
3. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и статистического представления результатов. М.: Издательство стандартов, 1983. 25 с.
4. ASTM STP. E 1049-85. (1985), Standard Practice for Cycle Counting in Fatigue Analysis. Pp. 778-786.
5. Гадолина И.В., Козлов А.Д., Монахова А.А. и др. Оптимальный способ ЦОС в задачах оценки долговечности // *Вестник РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика»*. 2019. № 1(2). С. 78-93. DOI: 10.28995/2686-679X-2019-1-78-93
6. Хинчин А.Я. Теория корреляции стационарных стохастических процессов // *Успехи математических наук*, 1938. № 5. С. 42–51.
7. Fuchs H.O. et al. Shortcut in Cumulative Damage Analysis. In: *Fatigue Under Complex Loading*, Society of Automotive Engineers. Warrendale, PA, 1977. Pp. 145–156.
8. Mengel F., Orlandi L., Weidenholzer S. Match length realization and cooperation in indefinitely repeated games // *Journal of Economic Theory*. 2022. Vol. 200. 105416. DOI: 10.1016/j.jet.2022.105416
9. Баранов Л.А., Балакина Е.П., Чжан Ю. Анализ погрешностей прогноза для интеллектуальных систем управления и предиктивной диагностики // *Надежность*. 2023. № 2. С. 12-18. DOI: 10.21683/1729-2646-2023-23-2-12-18
10. Орлов А.А., Сыпало К.И., Городниченко В.И. и др. Применение нейросетевых технологий искусственного интеллекта для мониторинга нагрузок в силовых элементах авиационных конструкций // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023. № 89(5). С. 56-63. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-5-56-63
11. Маслов С.В. Применение натурной тензометрии для исследования напряженного состояния нового энергетического оборудования // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. № 88(12). С. 64-74. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-12-64-74

12. White M., Rajkumar R. Minimal Dependency Length in Realization Ranking. In *Proceedings of the 2012 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning*, pages 244–255, Jeju Island, Korea, 2012. Association for Computational Linguistics.

13. R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

14. Irvin T. Rainflow Fatigue Cycle Counting, C++, 2011. *Vibrationdata*, Madison, Alabama, USA.

15. Когаев В.П., Гадолина И.В. Расчет деталей машин при нерегулярном режиме нагружения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1991. № 5. С. 45.

16. Фишер Р., Хайбах Э. Моделирование функций нагружения в опытах по оценке материалов. В кн.: *Поведение стали при циклических нагрузках* / Под ред. В. Даля. Перевод с немецкого. М.: Металлургия, 1983. С. 368-405.

17. Черезов А.А. Структурный анализ процесса нагружения элементов конструкции мехлопат // *Уголь*. 2011. № 2. С. 48-50.

18. Галканов А.Г. Об инновационных методах усреднения числовых данных // *Вестник РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика»*. 2023. № 2. С. 81–101. DOI: 10.28995/2686-679X-2023-2-81-101

19. Гадолина И.В., Петрова И.М., Шашкова Е.В. и др. Анализ прочности и построение обобщенного блока нагружения для оценки долговечности тележки грузового вагона // *Труды конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение»*. М.: 2012. Т. 1. С. 67-72.

20. Лебединский С.Г. Расчетное моделирование развития усталостных трещин в стали литых деталей железнодорожных конструкций // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2018. № 1. С. 66-70.

## References

1. Kogaev V.P. [Time-variable strength calculations]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1993. (in Russ.)
2. Gadolina I.V. Reconsidering the role of tests in case of irregular loading in the process of drawing research conclusions regarding the durability limit. *Dependability* 2023;3:23-27.
3. ГОСТ 25.101-83. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1983. (in Russ.)
4. ASTM STP. E 1049-85. Standard Practice for Cycle Counting in Fatigue Analysis; 1985. Pp. 778-786.
5. Gadolina I.V., Kozlov A.D., Monakhova A.A., et al. Optimal Decision for Digital Signal Processing in the Durability Assessment Problem. *RSUH Bulletin. Series "Information Science". Information Security. Mathematics* 2019; 1(2):78-93. DOI: 10.2686-679X-2019-1-78-93.

6. Khinchin A.Ya. [Theory of correlation of stationary stochastic processes]. *Uspekhi matematicheskikh nauk* 1938;5:5-51. (in Russ.)
7. Fuchs H.O. et al. Shortcut in Cumulative Damage Analysis. In: *Fatigue Under Complex Loading*. Society of Automotive Engineers; Warrendale (PA); 1977. Pp. 145-156.
8. Mengel F., Orlandi L., Weidenholzer S. Match length realization and cooperation in indefinitely repeated games. *Journal of Economic Theory* 2022;200(105416). DOI: 10.1016/j.jet.2022.105416.
9. Baranov L.A., Balakina E.P., Zhang Yu. Prediction error analysis for intelligent management and predictive diagnostics systems. *Dependability* 2023;23(2):12-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-12-18>
10. Orlov A.A., Sypalo K.I., Gorodnichenko V.I., Bautin A.A. Application of neural network technologies to load monitoring in aircraft structure bearing elements. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials* 2023;89(5):56-63. (in Russ.) DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-5-56-63
11. Maslov S.V. The use of full-scale tensometry for studying the stress state of new power equipment. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials* 2022;88(12):64-74. (in Russ.) DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-12-64-74.
12. White M., Rajkumar R. Minimal Dependency Length in Realization Ranking. In: *Proceedings of the 2012 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning*. Jeju Island (Korea); 2012. Pp. 244-255.
13. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing; Vienna (Austria). Available at: <http://www.R-project.org/>; 2020.
14. Irvin T. Rainflow Fatigue Cycle Counting, C++. Madison (Alabama, USA); 2011.
15. Kogaev V.P., Gadolina I.V. [Machine part calculation under irregular loading]. *Problemy mashinostroyeniya i nadiozhnosti mashin* 1991;5:45. (in Russ.)
16. Fischer R., Haibach E. [Modeling loading functions in material evaluation experiments]. In: Dahl V., editor. [Behaviour of steel under cyclic loads]. Moscow: Metallurgiya; 1983. Pp. 368-405.
17. Cherezov A.A. [Structural analysis of the process of power shovel component loading]. *Ugol* 2011;2:48-50. (in Russ.)
18. Galkanov A.G. About innovative methods of numerical data averaging. *RSUH/RGGU "Information Science. Information Security. Mathematics" Series* 2023;2:81-101. DOI: 10.28995/2686-679X-2023-2-81-101. (in Russ.)
19. Gadolina I.V., Petrova I.M., Shashkova E.V. et al. [Strength analysis and construction of a generalized loading block for assessing the durability of a freight wagon bogey]. In: [Proceedings of the Conference Survivability and Structural Materials Science]. Moscow; 2012. Pp. 67-72. (in Russ.)
20. Lebedinsky S.G. [Computational modeling of the development of fatigue cracks in steel cast parts of railway structures]. *Problemy mashinostroyeniya i nadiozhnosti mashin* 2018;1:66-70.

## Сведения об авторе

**Гадолина Ирина Викторовна** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, e-mail: [gadolina@mail.ru](mailto:gadolina@mail.ru)

## About the author

**Irina V. Gadolina**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: [gadolina@mail.ru](mailto:gadolina@mail.ru).

## Вклад автора

Автором исследовано влияние особенностей процесса на вычисленный ресурс конструкций. На основании анализа выдвинута концепция стационарного в специальном смысле процесса. Выполнено исследование данного положения для ряда машиностроительных изделий.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.