
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 519.246,620.178,629.367

**СТАБИЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕННОСТИ
В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН**© 2020 г. И. В. Гадолина^{1,*}, Д. А. Дубин², И. М. Петрова¹, И. Л. Серебрякова²¹*Институт машиноведения имени А.А. Благодрава РАН, г. Москва, Россия*²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия***e-mail: gadolina@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.08.2018 г.

Принята к публикации 25.10.2019 г.

Для обоснованной и достоверной оценки долговечности на стадии проектирования машины или ее эксплуатации необходима информация о нагруженности. Для надежной характеристики нагруженности a , следовательно, и долговечности, возникает вопрос о представительной длине реализации записи процесса. В статье предлагается методика определения необходимой и достаточной длины реализации. Эффективность предложенной методики продемонстрирована на примере оценки нагруженности торсионных валов системы поддрессоривания быстроходной гусеничной машины. Дано обоснование необходимой и достаточной длины записи случайных процессов.

Ключевые слова: случайные процессы, нагружение, методы схематизации, коэффициент нерегулярности, накопление повреждений, долговечность

DOI: 10.31857/S023571192001006X

Для оценки долговечности на стадии проектирования и эксплуатации элементов конструкций необходима информация о процессе нагружения, представляемая обычно в форме распределения амплитуд напряжений с соответствующим им числом повторений в процессе эксплуатации [1]. Распределение амплитуд напряжений получают путем обработки записанных в эксплуатации процессов нагружения различными методами схематизации [2] или рассматривая случайные процессы для аналогичных элементов конструкций путем использования спектральной плотности [3, 4].

При планировании эксперимента по сбору и обработке информации о нагруженности возникает ряд методических вопросов, которые еще не получили исчерпывающей научной проработки, в частности, о необходимой и достаточной зафиксированной длине реализации процесса нагружения. Анализ случайных процессов с целью последующей оценки долговечности имеет свою специфику из-за того, что для оценки усталости большое значение имеет информация об амплитудах и числах их повторений [5]. Именно эти характеристики случайного процесса оказывают наибольшее влияние на накопление усталостных повреждений, как на стадии зарождения, так и на стадии развития усталостных трещин [6]. В работе [7] рассмотрен пример стабилизации величины математического ожидания (МО) с увеличением длины реализации процесса нагружения. Рекомендовано считать длину реализации, при которой значение МО процесса нагружения стабилизируется и не выходит за пределы ранее принятой ошибки, достаточной для обоснованной оценки долговечности. В [8] была иссле-

дована долговечность, вычисленная на основании пятидесяти выборок. Показано, что стандартное отклонение величины усталостного повреждения стремится к нулю при увеличении длины численно моделируемой реализации.

Выбор необходимой длины реализации зависит от рассматриваемых элементов конструкций и условий их эксплуатации. Стандарт [2] рекомендует использовать реализации с длиной не менее тысячи экстремумов. Данная рекомендация нуждается в уточнении. *Во-первых*, число выделенных экстремумов сильно зависит от числа классов разбиения случайного процесса по ординате, т. е. определяется точностью регистрации случайного процесса нагружения. Согласно ГОСТ [2] процесс предварительно разбивается на классы, при этом ширина класса Δ находится по формуле

$$\Delta = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{M}, \quad (1)$$

где σ_{\max} и σ_{\min} – максимальная и минимальная величины случайного процесса в реализации; M – число классов, выбирается в интервале $M = 12, \dots, 36$ [2]. В каждом классе фиксируется лишь одно значение случайного процесса, поэтому, чем меньше классов, тем меньше регистрируется экстремумов у одной и той же реализации.

Во-вторых, известны опытные данные [9], когда при надлежащем выборе полосы фильтрации процесса число экстремумов в реализации можно уменьшить в десять раз. При этом величина долговечности, выраженная в числе блоков нагружения, изменяется лишь на 10%.

При анализе нагруженности в общем случае необходимо рассматривать обобщенный процесс, состоящий из частных случайных процессов, записанных при разных условиях эксплуатации, который и будет в дальнейшем использоваться для оценки долговечности в эксплуатации [10]. Целью данной статьи является выбор необходимой длины реализации для оценки долговечности элементов ходовой части быстроходных гусеничных машин. Для получения устойчивой оценки нагруженности необходимо, чтобы на каждом из частных режимов нагружения его характеристики были стабильны и устойчивы. При этом проводится оценка характеристик нагруженности на каждом режиме. Для обоснования выбора длины реализации случайных процессов рассматривается как меняется величина вычисленной долговечности N_{Σ} с увеличением длины реализации. Мерой, ответственной за величину N_{Σ} , может служить функция накопленных полных циклов $\Omega = n(\sigma_a)$, или блок нагружения, где n – число циклов повторения амплитуды напряжений σ_a . Функция Ω определяется обработкой случайного процесса с использованием однопараметрических, или двухпараметрических методов схематизации [2, 11]. Характеристикой блока нагружения Ω является его длина l_b , величина которой в зависимости от типа задачи и может быть выражена в числах циклов нагружения, часах, километрах пробега и пр.

Если реализация L , по которой производится оценка долговечности стационарного процесса коротка, то оценка Ω результирующего нагрузочного спектра неустойчива, что приводит к значительным отклонениям в оценке долговечности. Чем длиннее реализация, тем меньше отклонения. Оценку долговечности, выраженную в числе блоков нагружения, вычисленную по гипотетической бесконечной реализации обозначим как $N_{\Sigma}(\infty)$. Обозначим оценку долговечности по реализации ограниченной длины L как $N_{\Sigma}(L)$. При увеличении длины реализации стационарного случайного процесса в задаче оценки долговечности существует предел

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{N_{\Sigma}(L)}{N_{\Sigma}(\infty)} = 1. \quad (2)$$

Поскольку не существует физической возможности измерить напряжения на бесконечной длине, то следует ограничиться доступной длиной реализации, обеспечивая



Рис. 1. Испытательные трассы.

ющей требуемую точность ε оценки N_{Σ} . Погрешность оценки долговечности ε в зависимости от длины реализации задается в каждом конкретном случае с учетом требований к точности оценки ресурса. Можно определить необходимую и достаточную длину реализации L_{NS} . Если для некоторого случайного процесса нагружения существует предел (2), то необходимую и достаточную длину реализации $L = L_{NS}$ можно определить из условия

$$\left| \frac{N_{\Sigma}^*(L_{NS})}{N_{\infty}} - 1 \right| < \varepsilon. \quad (3)$$

Методика проведения исследования. Для оценки ресурса торсионных валов системы подрессоривания гусеничной машины, проведено тензометрирование параметров нагружения (многоцикловое кручение) при движении гусеничной машины по лесным грунтовым дорогам (рис. 1), что соответствует реальным эксплуатационным условиям.

Определение кинематических и силовых параметров нагружения осуществлялось с применением специализированной измерительной аппаратуры, установленной на корпусе машины (рис. 2), путем записи углов закрутки торсионных валов при движении гусеничной машины по испытательным трассам [2].

Для обработки полученных случайных процессов разработан комплекс программ на языке R [13]. В соответствии с [2] в комплексе осуществлялись, операции, предваряющие схематизацию: 1) квантование – разбивка процесса по уровням по горизонтали (1); 2) дискретизация – замена непрерывного процесса последовательностью случайных ординат; 3) выделение экстремумов; 4) подсчет коэффициента нерегулярности χ .

Поскольку процессы нагружения случайны, для их исследования часто привлекается аппарат спектрального анализа. Опираясь с понятиями спектральной плотности случайного процесса, используется коэффициент нерегулярности случайного процесса χ [3, 14, 15], который служит мерой сложности случайного процесса и определяется как отношение числа пересечений среднего уровня к числу экстремумов

$$\chi = N_0/N_e, \quad (4)$$

где N_0 – число пересечений среднего уровня, N_e – число экстремумов.

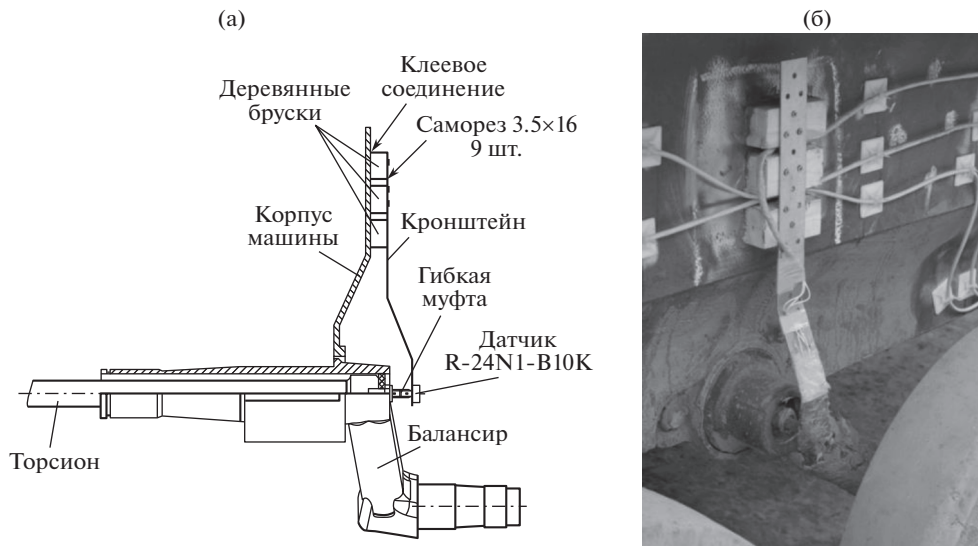


Рис. 2. Измерительное оборудование, установленное на корпусе и подвесках гусеничной машины: (а) – схема крепления; (б) – установка на подвеске.

После предварительного этапа проводится схематизация случайной последовательности. Были сопоставлены метод экстремумов, метод размахов и метод дождя [1, 2, 11]. В работе [16] показано, что долговечности, подсчитанные по методу экстремумов и методу размахов, могут служить верхней (по размахам) и нижней (по экстремумам) оценкой долговечности. Наиболее предпочтительным является использование метода дождя [16]. Для оценки долговечности используется уравнение кривой усталости в виде [1]

$$\sigma_a^m N = \sigma_{-1}^m N_G, \quad (5)$$

где σ_a – амплитуда напряжений, МПа, N – предельное число циклов до разрушения для σ_a ; σ_{-1} – предел выносливости; m – показатель угла наклона кривой усталости; $N_G = 2 \times 10^6$.

Запишем кривую усталости в относительных величинах

$$N = N_G (1/n_p)^m, \quad (6)$$

где $n_p = \sigma_a / \sigma_{-1}$.

Для обоснования требуемой длины реализации необходимо оценить влияние стабильности информации о нагруженности на погрешность оценки ресурса. Для оценки ресурса необходимо знать не только характеристики сопротивления усталости рассматриваемого элемента конструкции (5) и их рассеяние, которые получают экспериментально или расчетом по ГОСТ [17], но также следует принять гипотезу накопления усталостных повреждений. В [18] используют упрощенную скорректированную гипотезу суммирования усталостных повреждений, полученную в результате анализа большого количества экспериментальных данных по оценке долговечности или ресурса при различных распределениях амплитуд напряжений.

$$\lambda_6 \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 0.25, \quad (7)$$

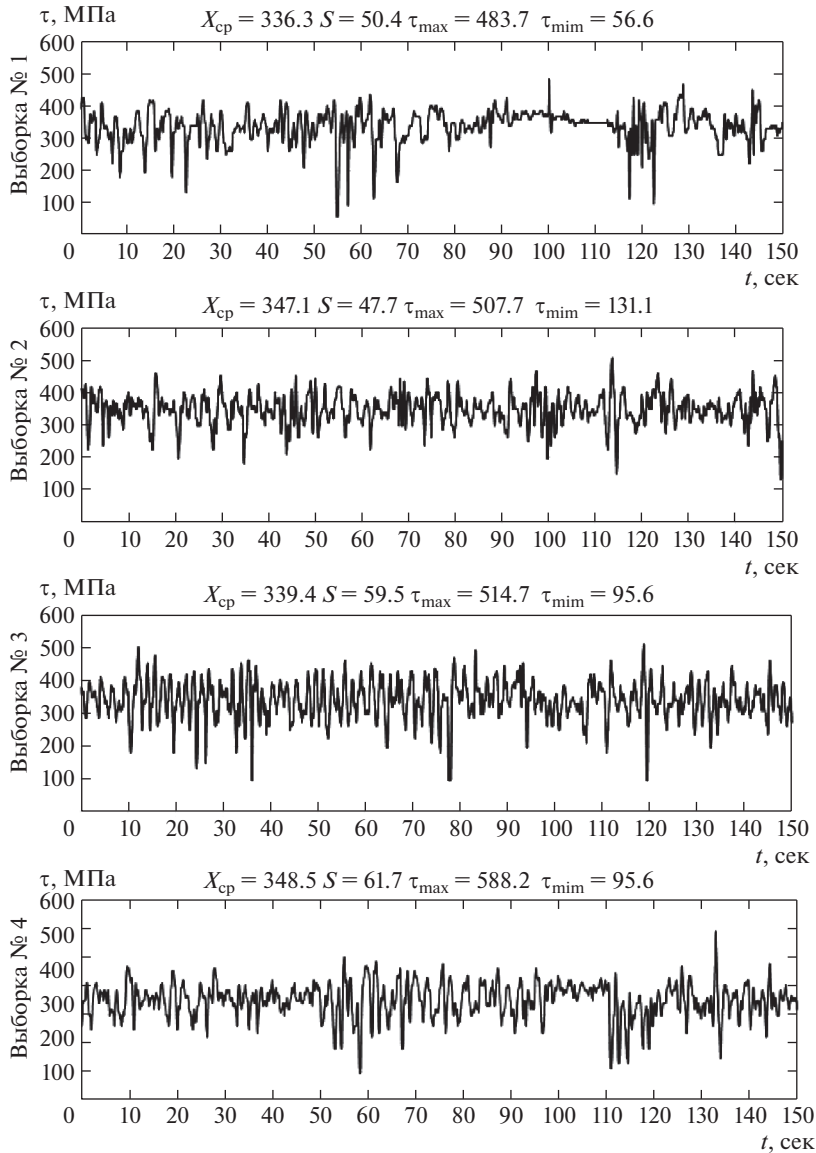


Рис. 3. Реализации случайных процессов изменения касательных напряжений в торсионном валу гусеничной машины.

где λ_6 – расчетное число блоков до разрушения; n_i – число циклов повторения амплитудой напряжений σ_{ai} в блоке нагружения; N_i – предельное число циклов по кривой усталости, полученной при регулярном нагружении, соответствующее амплитуде σ_{ai} , и определяемое из уравнения кривой усталости (5).

Суммарная долговечность (ресурс) равна

$$N_{\Sigma} = \lambda_6 L. \quad (8)$$

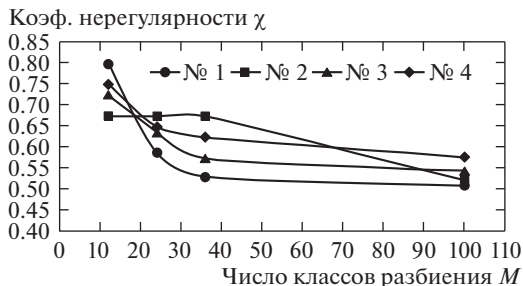


Рис. 4. Зависимость вычисленного коэффициента нерегулярности χ от числа классов разбиения случайного процесса M .

Используя формулу (7) после подстановки в (8) получим

$$N_{\Sigma} = \frac{0.25L}{\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}} \quad (9)$$

В формуле (9) числитель и знаменатель увеличиваются с увеличением длины реализации L . Знаменатель растет, так как чем больше длина реализации, тем больше регистрируется циклов n_i . При увеличении L величина вычисленного ресурса $N_{\Sigma}(L)$ стабилизируется. Длина реализации, при которой величина N_{Σ} стабилизируется, будет являться необходимой и достаточной для данной реализации случайного процесса нагружения L_{NS} для вычисления ресурса с приемлемой точностью.

Результаты исследования. В результате экспериментального исследования получены временные диаграммы изменения углов закрутки торсионных валов при движении гусеничных машин по неровностям местности.

Для преобразования исходных кинематических параметров в значения касательных напряжений используем зависимость

$$\tau = \frac{((\beta_{ст} - \beta_0) + \gamma)Gd_T}{2L_T}, \quad (10)$$

где γ — угол закрутки торсионного вала; $\beta_{ст}$ — статическое угловое положение балансира; G — модуль упругости второго рода материала торсиона; β_0 — угловое положение балансира при нулевой закрутке торсиона; L_T — длина торсионного вала, d_T — диаметр торсионного вала. Полученные реализации случайного процесса нагружения с указанием основных статистических характеристик приведены на рис. 3.

Величина χ весьма условна и находится в сильной зависимости от числа уровней квантования случайного процесса M (рис. 4), где для полученных реализаций показаны зависимости $\chi(M)$. Коэффициент нерегулярности процессов, определяемый по формуле (4) в среднем для рассматриваемых процессов составляет $\chi = 0.55$. При увеличении числа классов M величина χ уменьшается. С уменьшением числа классов разбиения величина χ увеличивается почти в полтора раза по сравнению с более детальным разбиением.

На рис. 5 показаны отношения долговечностей N к долговечности N_d , вычисленных на основании метода экстремумов и метода размахов, где N_d вычисляется на основе метода дождя при переменном параметре m . Видно, что расхождение вычисленных ресурсов весьма существенно, особенно при увеличении m . Данный факт характерен для процессов со сложной структурой [16].

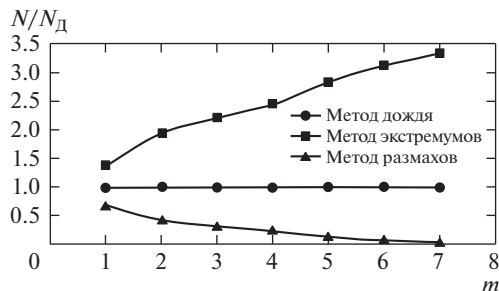


Рис. 5. Сопоставление отношений вычисленных долговечностей по методу экстремумов размахов к вычисленной по методу дождя.

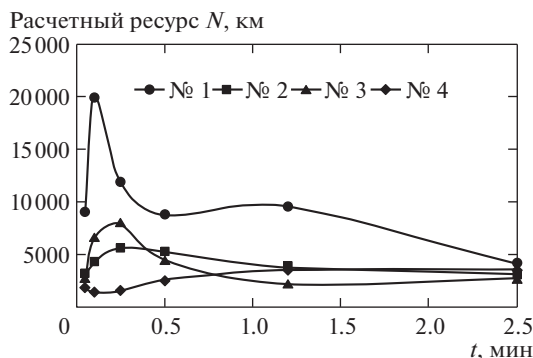


Рис. 6. Зависимость вычисленной долговечности от длины реализации, $m = 6$.

На рис. 6 приведены зависимости вычисленных долговечностей, полученных для реализаций, представленных на рис. 3 при увеличении длин реализаций. При расчете использована запись кривой усталости в относительной форме (6). Для реализаций 2, 3 и 4 условие (3) выполняется при необходимой и достаточной длине реализации, соответствующей длине записи $L_{NS} = 1.5$ мин. Для реализации 1 стабилизации не наблюдается даже при длине записи 2.5 мин.

Выводы. Предложена методика по определению необходимой и достаточной длины реализации случайного процесса. С использованием разработанной методики решена задача по определению необходимой и достаточной длины реализации случайного процесса нагружения на примере оценки долговечности торсионного вала индивидуальной системы подрессоривания. Методику можно использовать при планировании исследований нагруженности элементов ходовой части быстроходных гусеничных машин.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

2. 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.
3. Гусев А.С., Щербаков В.И., Стародубцева С.А. Расчет усталостной долговечности элементов конструкций при случайных процессах нагружения сложной структуры // Ж. Вестник машиностроения, 2015. Т. 12. С. 20.
4. Benasciutti D., Tovo R. Frequency-based analysis of random fatigue loads: Models, hypotheses, reality // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2018. V. 49(3). P. 345.
5. Gadolina I., Zaynetdinov R. The estimation of the sufficient random loading realization length in the problem of machine parts longevity // The 9th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT'2018 24–27 May, 2018. Kyiv, Ukraine. P. 166.
6. Лебединский С.Г. Расчетное моделирование развития усталостных трещин в стали литых деталей железнодорожных конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 1. С. 66.
7. Березин И.Я., Рихтер Е.Е., Абызов А.А., Хрипунов Д.В. Статистическая механика и надежность машин / Учебное пособие к курсовому проекту. Челябинск. Издание ЮУрГУ, 2011. 59 с.
8. Braccesi C., Cianetti F., Lori G., Pioli D. Evaluation of mechanical component fatigue behavior under random loads: Indirect frequency domain method // International Journal of Fatigue. 2014. V. 61. P. 141.
9. Fuchs H.O., Nelson D.V., Burke M.A., Toomay T.L. Shortcuts in Cumulative Damage Analysis. In book: Fatigue under Complex Loading. SAE, 1977, 207 p.
10. Петрова И.М., Гадолина И.В. Создание обобщенного спектра нагружения при различных вариантах нагружения в эксплуатации // Сб. трудов конференции “Чтения памяти Кубачека”, 2018. С. 318.
11. ASTM E 1049-85 (Reapproved 2005). Standard practices for cycle counting in fatigue analysis. ASTM International.
12. Дубин Д.А., Наказной О.А., Смирнов И.А., Шлеев А.Н. Экспериментальное определение кинематических и силовых параметров нагружения элементов системы подрессоривания быстроходной гусеничной машины // Труды НАМИ. 2016. № 3 (266). С. 45.
13. R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org>
14. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М. Машиностроение, 1984. 382 с.
15. Шефер Л.А. Обобщенная диаграмма усталости материалов при действии различных случайных, гармонических и полигармонических процессов / Л.А. Шефер, А.В. Ерпалов, Д.Х. Валеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. С. 58.
16. Гадолина И.В., Петрова И.М. Анализ влияния параметров обработки случайного процесса нагружения на точность оценки ресурса // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1996. № 3. С. 62.
17. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. 132 с.
18. Когаев В.П., Гадолина И.В. Суммирование усталостных повреждений при вероятностных расчетах долговечности // Ж. Вестник машиностроения. 1989. № 7. С. 3.