

УДК 621.81.001

КРИТЕРИИ ВЫБОРА МЕТОДОВ СХЕМАТИЗАЦИИ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕСУРСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А. В. ШМЕЛЕВ

*Научно-инженерное республиканское унитарное
предприятие «Белавтотракторостроение»
НАН Беларуси*

А. А. РАКИЦКИЙ

*Государственное научное учреждение «Институт
механики и надежности машин НАН Беларуси»*

Введение

Несущие конструкции и детали грузовых автомобилей в эксплуатации подвержены случайному нагружению, которое характеризуется силами и моментами, передаваемыми через колеса со стороны дороги. При оценке усталостной долговечности непосредственный интерес представляют процессы изменения напряжений или деформаций в опасных зонах исследуемого объекта, приводящие к его разрушению. Они, как правило, представляются в дискретном виде, т. е. текущие значения напряжений записываются через постоянный интервал времени – период квантования или дискретизации. Разработан целый ряд методов схематизации, заключающихся в выделении из исходного процесса нагружения отдельных циклов или полциклов регулярного нагружения, используемых далее для расчета ресурса конструкций.

Цель работы

Анализ применимости существующих методов схематизации случайного нагружения с использованием фильтрации процессов по их повреждающему действию.

Объект и методы исследования

Известные методы схематизации можно разделить на две основные группы: однопараметрические и двухпараметрические [1]. Однопараметрические методы (экстремумов, размахов, пересечений заданных уровней) приводят к значительным погрешностям при расчете усталостной долговечности. Это вызвано учетом наложенных высокочастотных составляющих на компоненты с более низкой частотой, но со значительно большей амплитудой цикла, вызванной колебанием подрессоренной массы автомобиля, а также вследствие изменения значений среднего напряжения цикла.

Наибольшее отражение в литературе и применении на практике получили двухпараметрические методы «потоков дождя» и полных циклов [1]–[4]. Их использование, как правило, позволяет избежать перечисленных выше недостатков однопараметрических методов схематизации и достаточно точно выделить все циклы и полциклы нагружения независимо от сложности эксплуатационных процессов. Эти методы основаны на представлении каждого нагрузочного цикла в виде замкнутой петли гистерезиса в координатах деформация-напряжение, что отражает физику протекающих процессов при циклической деформации металла.

В работе [5], на основе анализа результатов эксперимента по определению усталостной долговечности образцов стали 40X при двухчастотном регулярном нагружении, был предложен метод полуциклов с использованием огибающей процесса нагружения для выделения низкочастотных циклов эксплуатационных процессов. Проведем сравнение методов «потоков дождя» и полуциклов с огибающей при схематизации эксплуатационного нагружения рамы автомобиля-самосвала МАЗ.

Испытания проводились на автополигоне ФГУП НИЦИАМТ, г. Дмитров, РФ. Тензометрировались наиболее опасные по усталости зоны, находящиеся на нижних полках лонжеронов рамы. Заезды выполнялись по бульжной дороге профилированного мощения со скоростью 40 км/ч в груженом состоянии, что является очень жестким режимом нагружения. Анализ методов проведем на результатах двух заездов.

Материал лонжеронов – сталь 17Г1С. Характеристики сопротивления усталости данной стали получены при испытаниях плоских образцов в условиях растяжения-сжатия. Образцы вырезались из полос металла, применяемых при изготовлении лонжеронов, по направлению прокатки. Пересчет значений пределов выносливости на 95 % вероятность неразрушения выполнялся при уровне доверительной вероятности 99 % [6]. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики сопротивления усталости опасной зоны

Предел выносливости при симметричном цикле – σ_{-1} , МПа	94,6
Параметр уравнения кривой усталости – v_0 при симметричном цикле, МПа	36,19
Показатель угла наклона кривой усталости – v при симметричном цикле, МПа	30,87
Предел выносливости при отнулевом цикле – σ_0 , МПа	155,7
Параметр уравнения кривой усталости – v_0 при отнулевом цикле, МПа	61,33
Показатель угла наклона кривой усталости – v при отнулевом цикле, МПа	51,83
Базовое число циклов – N_0 , тыс. циклов	520700

Приведение асимметричных циклов напряжений к эквивалентным по повреждению симметричным выполнялось с использованием диаграммы предельных амплитуд Кинасошвили-Серенсена как для циклов с максимальным напряжением больше начального предела выносливости, так и меньше его. Расчет долговечности был основан на применении кинетической гипотезы суммирования усталостных повреждений [5], позволяющей учитывать изменение характеристик сопротивления усталости по мере накопления повреждений. Это позволило оценить действие циклов с максимальным напряжением ниже начального значения предела выносливости.

Для автоматизации расчетов использовалась разработанная авторами компьютерная программа «Resurs». Полученные результаты прогнозирования усталостной долговечности представлены в табл. 2.

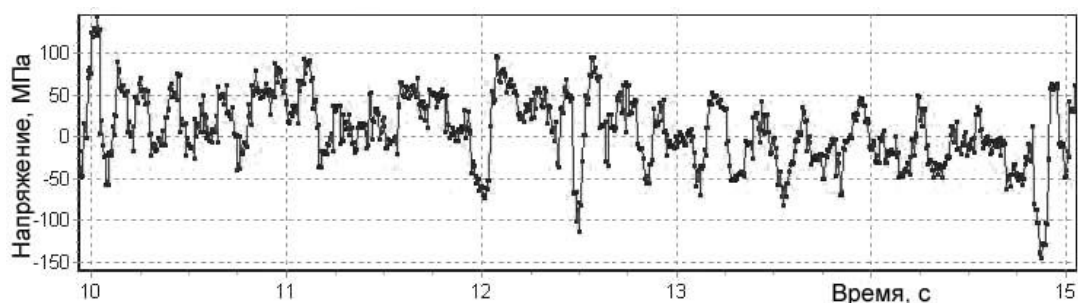
Таблица 2

Расчетная пробег рамы автомобиля-самосвала МАЗ, тыс. км

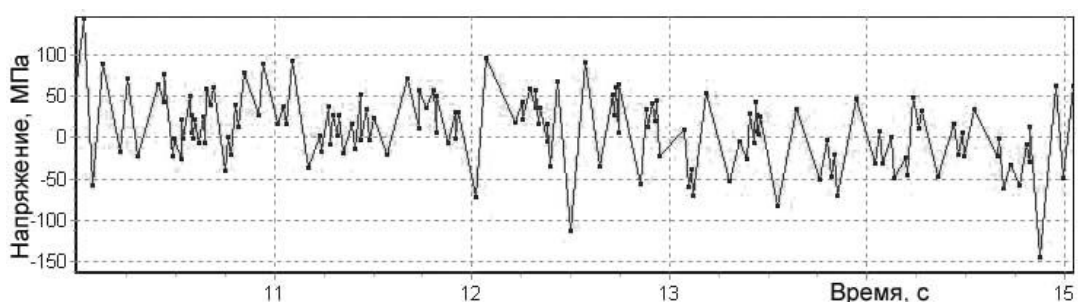
Номер заезда	Метод «потоков дождя»	Метод полуциклов с огибающей
1	96	*
2	101	590

* Ни одно из максимальных напряжений выделенных циклов процесса не превысило начальный предел выносливости.

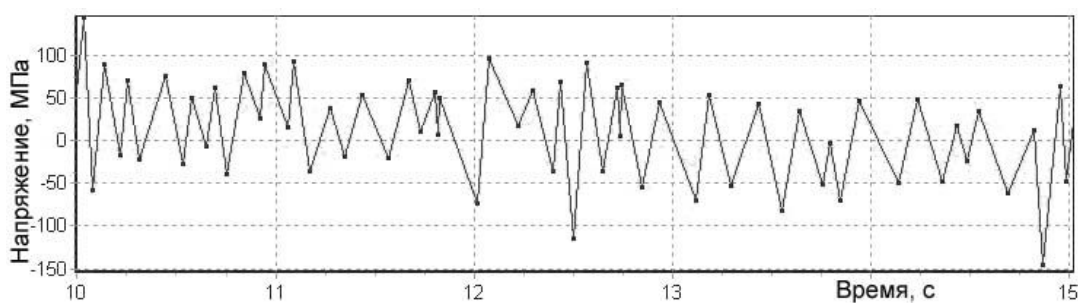
Как видно из табл. 2, полученные результаты имеют значительное различие, которое непросто объяснить. Для анализа было предложено провести фильтрацию исходных процессов нагружения по повреждающему действию с последующей оценкой долговечности. Суть ее заключалась в том, что из процесса нагружения удалялись циклы, повреждающее действие которых не превышало определенной величины ($\sigma_{\text{нп}}$), задаваемой амплитудой напряжения при симметричном цикле. Иначе говоря, фильтрация осуществлялась с учетом асимметрии цикла: текущий цикл процесса приводился к эквивалентному по повреждению симметричному, который сравнивался с заданной величиной. При значении амплитуды приведенного напряжения текущего цикла, равной либо меньшей этой величины, цикл исключался из процесса. Результат такого подхода продемонстрирован на рис. 1, где показан фрагмент исходного процесса нагружения, полученный в первом заезде, и результаты его амплитудной фильтрации с величиной отбрасываемых напряжений $\sigma_{\text{нп}} = 20$ и 40 МПа, соответственно.



а)



б)



в)

Рис. 1. Фильтрация процесса нагружения наиболее опасной зоны рамы:
а – исходный процесс; б, в – процессы с величиной отброшенных напряжений цикла 20 и 40 МПа, соответственно

Таким образом были обработаны процессы нагружения двух заездов с величиной отбрасываемых напряжений от $\sigma_{\text{нп}} = 10$ до 90 МПа, эквивалентных по повреж-

дению напряжениям при симметричном цикле. В последнем случае максимальная величина отбрасываемых напряжений практически равнялась пределу выносливости. Для каждого полученного таким образом процесса была проведена оценка долговечности с использованием тех же методов, что и в предыдущем случае. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетная долговечность рамы автомобиля-самосвала МАЗ

Метод схематизации	Номер заезда	Пробег, тыс. км								
		Величина отброшенного напряжения, МПа								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
«потоков дождя»	1	96	96	96	96	98	98	101	110	117
	2	101	101	101	101	102	103	106	114	131
полуциклов с огибающей	1	618	282	279	272	286	255	194	167	167
	2	440	262	253	248	231	178	174	150	169

На рис. 2 дано графическое представление результатов оценки долговечности обработанных процессов нагружения в зависимости от величины отбрасываемых напряжений.

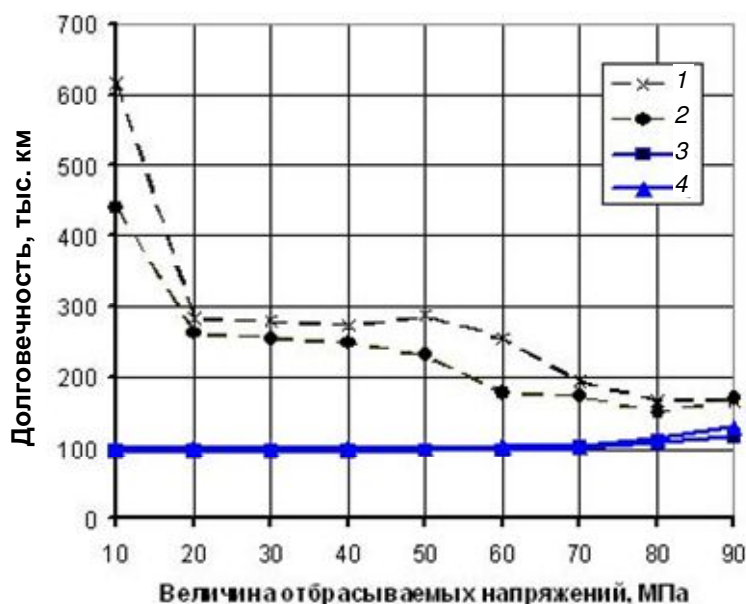


Рис. 2. Влияние амплитудной фильтрации на расчетную оценку долговечности: 1, 2 – метод полуциклов с огибающей; 3, 4 – метод «потоков дождя» для 1-го и 2-го заездов, соответственно

Сначала рассмотрим результаты оценки усталостной долговечности фильтрованных процессов нагружения, схематизированных методом «потоков дождя». Как видно из данных, представленных в табл. 3 и на рис. 2, величина отбрасываемых напряжений до 50 МПа не оказывает влияния на расчетную долговечность. Дальнейшее их увеличение ведет к росту долговечности, что вызвано отбросом уже повреждающих циклов процесса. Данные результаты хорошо согласуются с экспериментом [7], в котором оценивался уровень неповреждающих напряжений на элементы несущих конструкций грузовых автомобилей МАЗ. Он составил 0,5–0,7 предела выносливости, кроме того, была получена зависимость, аналогичная представленной на рис. 2 кривыми 3 и 4.

В случае применения метода полуциклов с огибающей увеличение амплитуды неучитываемых напряжений приводит к постоянному снижению расчетной долговечности. Причем из рис. 2 видно, как с увеличением величины отбрасываемых напряжений эти значения стремятся к значениям, которые были получены с использованием метода «потоков дождя». Это можно объяснить тем, что данный метод, в некоторых случаях, не позволяет в полной мере выделить повреждающее действие основных циклов нагружения, а отбрасывание малоамплитудных циклов, как видно из рис. 1, позволяет сразу получить эти циклы.

Проанализируем влияние уровня отбрасываемых напряжений на коэффициент нерегулярности процесса [1].

Как видно из рис. 3, оба исходных процесса нагружения изначально имеют равную нерегулярность, которая по мере увеличения отбрасываемых напряжений изменяется практически одинаково, что говорит о единой структуре процесса. По мере фильтрации исходного процесса последний приобретает регулярную форму, это позволяет использовать для его обработки более простые методы схематизации.

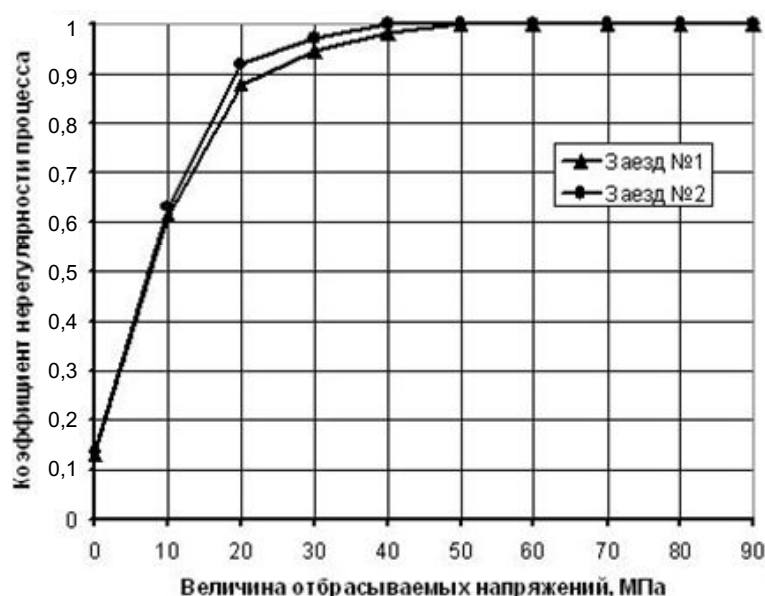


Рис. 3. Изменение коэффициента нерегулярности процесса нагружения в зависимости от изменения величины отбрасываемых напряжений

Проведенная фильтрация процессов также характеризует долю повреждающего действия циклов с напряжениями меньше предела выносливости. Для численного описания влияния отброса напряжений ниже предела выносливости на расчетную долговечность предлагается использовать отношение:

$$K_{\sigma < \sigma_{\text{нн}}} = 1 - K_{\sigma > \sigma_{\text{нн}}} = 1 - \frac{L_{\Sigma}}{L_{\sigma > \sigma_{\text{нн}}}},$$

где $K_{\sigma < \sigma_{\text{нн}}}$ – коэффициент, характеризующий долю повреждения, вносимую неучитываемыми напряжениями процесса, например, ниже предела выносливости; $K_{\sigma > \sigma_{\text{нн}}}$ – коэффициент, характеризующий долю повреждения, вносимую напряжениями процесса выше заданной величины; L_{Σ} – значение долговечности, определенное с учетом действия всех напряжений процесса; $L_{\sigma > \sigma_{\text{нн}}}$ – значение долговечности, определенное с использованием напряжений только выше заданного уровня напряжений.

Максимальные значения отбрасываемых напряжений в рассмотренном случае практически равны пределу выносливости. Поэтому, пользуясь данными табл. 3, можно рассчитать значение $K_{\sigma < \sigma_{\text{нн}}}$. Для рассматриваемых процессов нагружения эта величина составляет 0,18 и 0,23 для первого и второго заездов, соответственно (при использовании для схематизации процесса нагружения метода «потоков дождя»). Из этого следует, что для данных процессов нагружения напряжения ниже предела выносливости вносят повреждающее действие порядка 20 %.

Выводы

Таким образом установлено, что анализ фильтрации процессов нагружения по повреждающему действию, с применением при схематизации метода «потоков дождя» и кинетической теории суммирования усталостных повреждений, дают расчетные значения усталостной долговечности, совпадающие с экспериментальными данными.

Метод полуциклов с огибающей дал значительные отклонения в сторону завышения расчетной долговечности относительно метода «потоков дождя», а при использовании фильтрации было получено противоположное экспериментальному снижению долговечности с увеличением величины отбрасываемых напряжений, что вызвано недооценкой повреждающего действия основных несущих циклов. В результате чего можно рекомендовать его использование только для схематизации процессов нагружения с ярко выраженными частотными составляющими, либо регулярных процессов.

Предложенные коэффициенты $K_{\sigma > \sigma_{\text{нн}}}$ и $K_{\sigma < \sigma_{\text{нн}}}$ характеризует долю повреждения в сложных нерегулярных процессах нагружения, вносимую напряжениями выше и ниже заданной величины, например, предела выносливости. Они могут использоваться как для количественного описания повреждающей структуры процесса, так и в виде качественного показателя при совершенствовании методов схематизации случайных процессов и расчета их повреждающего действия.

Литература

1. ГОСТ 25.101–83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – Москва : Изд-во стандартов, 1983.
2. Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин: учеб. пособие для машиностр. специальностей вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – Москва : Высш. шк., 1991. – 319 с.
3. Amzallag C., Gerey J.P., Robert J.L., Bahuaud J. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis. International Journal of Fatigue 16 (1994). p. 287-293.
4. Jono M. Fatigue damage and crack growth under variable amplitude loading with reference to the counting methods of stress-strain ranges. International Journal of Fatigue 27 (2005). p. 1006-1015.
5. Почтенный, Е. К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций / Е. К. Почтенный. – Минск : Арти-Фекс, 2002. – 187 с.
6. Почтенный, Е. К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин / Е. К. Почтенный. – Минск : Наука и техника, 1983. – 246 с.
7. Ракицкий, А. А. О некоторых возможностях ускорения стендовых испытаний при случайном нагружении / А. А. Ракицкий, М. И. Горбацевич, В. И. Шоломицкий // Проблемы прочности. – 1988. – № 7. – С. 117–119.

Получено 21.06.2006 г.