

Аналитические зависимости для оценки усталостной прочности деталей и узлов железнодорожных транспортных средств по результатам обработки процессов динамических напряжений методом «дождя»



Б.А. Деркач,
д-р инж. наук, ведущий
эксперт ООО «Балтийский
Испытательный Центр»



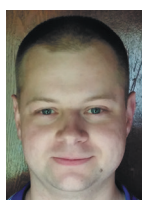
П.В. Поршневу,
магистр инж. наук,
ведущий исследователь
ООО «Балтийский
Испытательный Центр»



И.И. Вучегич,
канд. техн. наук,
технический руководитель
ООО «Балтийский
Испытательный Центр»



К.Н. Ляпшин,
магистр технических наук,
эксперт ООО «Балтийский
Испытательный Центр»



Р.В. Хальненков,
ведущий исследователь
ООО «Балтийский
Испытательный Центр»

Выведена формула, которая позволяет определить амплитуды эквивалентных напряжений при оценке усталостной прочности конструкций подвижного состава при схематизации случайных процессов динамических напряжений методом «дождя».

Для обработки результатов испытаний широко применяется схематизация случайных процессов методом «дождя». Такое название поясняется аналогией линий, соединяющих соседние экстремумы, при представлении оси времени, направленной вертикально вниз, с последовательностью крыш, по которым стекают потоки дождя [1]. Размах, соответствующий некоторому потоку дождя, равен расстоянию, пройденному потоком по горизонтали, т. е. про-

екции потока на горизонтальную ось. Каждый размах соответствует одному полуциклу напряжений. Амплитуда напряжений, полученная при схематизации процесса методом «дождя» (далее – амплитуда «дождя»), равна половине размаха.

Широкое распространение метода «дождя» объясняется тем, что он удобен для автоматизации обработки экспериментальных данных.

Процессы изменения динамических напряжений в деталях железнодорож-

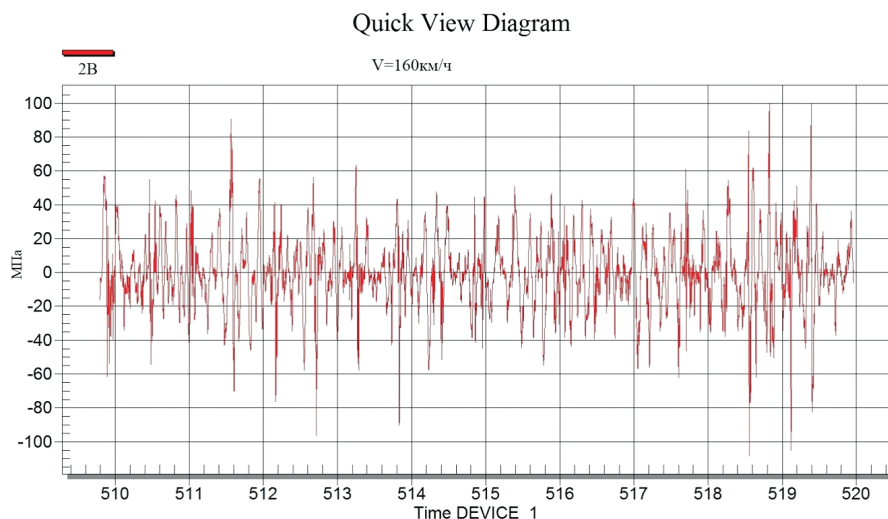


Рис. 1. График изменения напряжений в нижнем поясе рамы моторной тележки

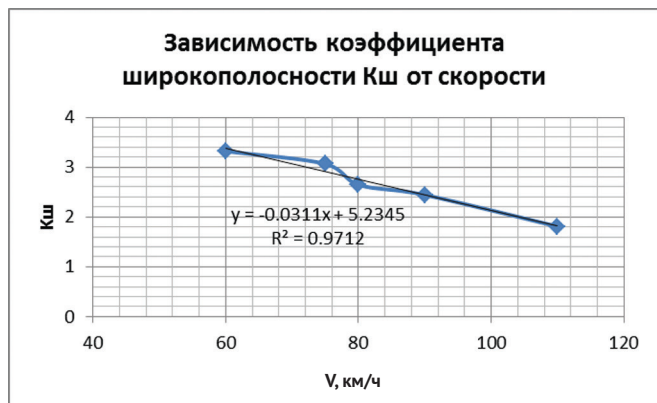


Рис. 2. Зависимость коэффициента широкополосности от скорости, рама тележки дизельного поезда

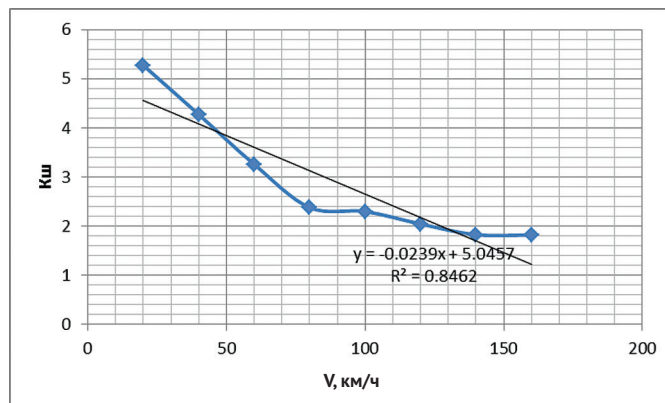


Рис. 3. Зависимость коэффициента широкополосности от скорости, рама тележки электропоезда

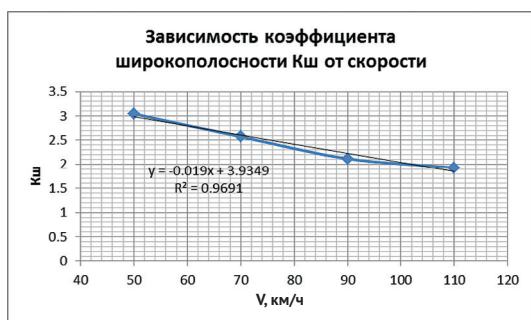


Рис. 4. Зависимость коэффициента широкополосности от скорости, рама тележки электровоза

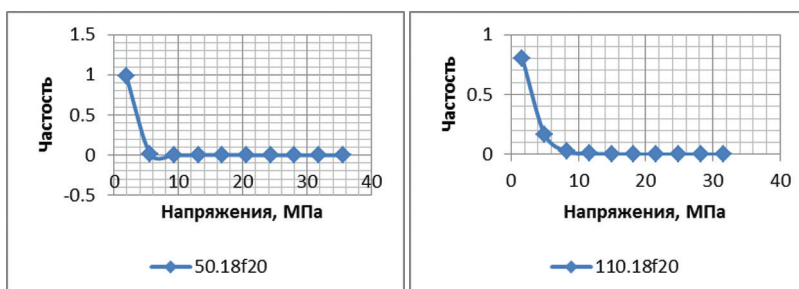


Рис. 5. Изменение распределения амплитуд «дождя» для напряжений в нижнем поясе продольной балки электровоза

ных транспортных средств имеют сложную структуру. На рис. 1 в качестве примеров приведены фрагменты реализаций напряжений в нижнем поясе рамы моторной тележки электропоезда.

Структура процесса характеризуется коэффициентом широкополосности – величиной, обратной коэффициенту нерегулярности процесса [1], т. е. отношением числа экстремумов к числу нулей.

По данным испытаний электропоездов, дизельных поездов, электровозов и пассажирских вагонов средние значения коэффициентов широкополосности находятся в пределах 2,5–8,0 при пропуски записей через 20-герцовый фильтр. Без фильтрации коэффициент сложности процессов достигает 50, а в некоторых случаях и превышает это значение.

С увеличением скорости движения значение коэффициента широкополосности уменьшается. На рис. 2–4 приведены графики изменения коэффициента широкополосности в зависимости от скорости для процессов изменения динамических напряжений в продольных балках рам тележек дизельного поезда, электропоезда и электровоза, соответственно.

Величина коэффициента сложности влияет на характер распределения амплитуд «дождя». На рис. 5 показано изменение распределения амплитуд «дождя» для напряжений в нижнем поясе продольной балки электровоза. При значениях коэффициента широкополосности более трех вероятности всех амплитуд, за исключением наиболее низкого уровня, близки к нулю. При коэффициентах широкополосности, близких к единице, распределение амплитуд близко к экспоненциальному.

На рис. 6 приведены графики плотности гамма-распределения для различных значений параметров распределения.

Из сравнения экспериментальных распределений с графиками двухпараметрического распределения следует, что распределение амплитуд напряжений, полученных методом «дождя», может быть описано двухпараметрическим гамма-распределением с параметрами: масштаба $\lambda = aK_{ш}$, формы $\alpha = bK_{ш}\bar{\sigma}$, а и b – экспериментальные коэффициенты, зависящие от вида подвижного состава и размерности, $\bar{\sigma}$ – среднее значение амплитуды, определенной методом «дождя». На рис. 7

приведены теоретическое и экспериментальное распределения для процесса динамических напряжений в продольной балке рамы тележки пассажирского вагона.

Параметры гамма-распределения для скорости 55 км/ч: $\alpha = 0,3$; $\lambda = 1,3$; для скорости 160 км/ч: $\alpha = 0,3$; $\lambda = 0,7$, значения коэффициентов $a = 0,316$; $b = 0,1$ 1/МПа.

Выведем расчетные зависимости для оценки усталостной прочности с учетом распределения амплитуд, определенного при схематизации процессов изменения динамических напряжений методом «дождя».

Приведем принимаемые допущения:

1. Усталостные повреждения суммируются линейно

$$\int_0^N \frac{dn}{N} = 1;$$

2. Уравнение кривой усталости $\sigma^m N = \text{const}$;

3. Кривая предельных напряжений диаграммы Смитта заменяется прямой, проходящей через точки $(\sigma_{-1}; 0)$ и (σ_b, σ_{-1}) . При такой аппроксимации переход

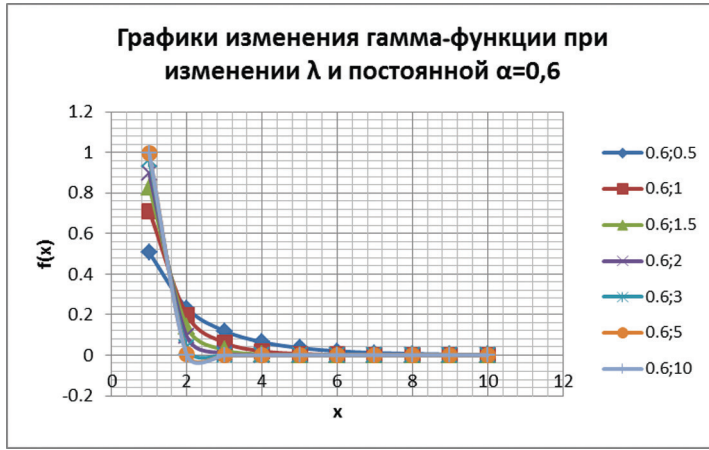


Рис. 6. Графики плотности гамма-распределения при изменении λ и постоянной $\alpha = 0,6$

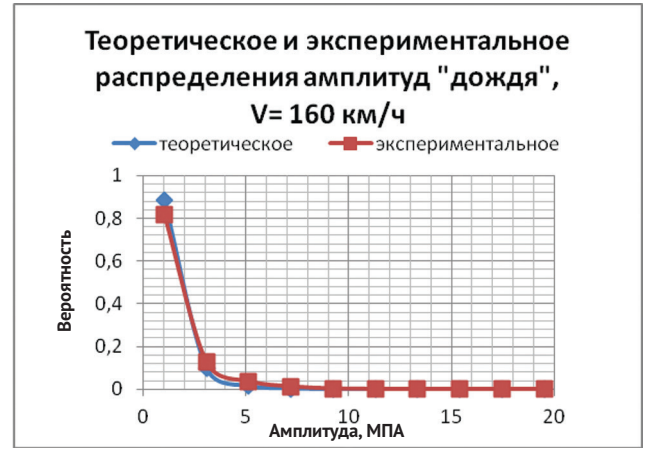


Рис. 7. Теоретическое и экспериментальное распределения для процесса динамических напряжений в продольной балке рамы тележки пассажирского вагона

от амплитуд асимметричных циклов к амплитудам симметричных осуществляется по соотношениям

$$\varphi = \frac{\sigma_b - \sigma_m}{\sigma_b} \text{ при } \sigma_m \geq 0$$

$$\text{и } \varphi = 1 - \frac{|\sigma_m|}{2\sigma_b} \text{ при } \sigma_m < 0.$$

С учетом плотности распределения амплитуд эксплуатационных напряжений $f(\sigma)$

$$N_3 \int_0^{\sigma_{-1}} \frac{\sigma^m f(\sigma) d\sigma}{\sigma_{-1}^m N_0} = 1,$$

где N_3 – полное число циклов в эксплуатации; N_0 – базовое число циклов; σ – текущее значение амплитуд динамических напряжений; σ_{-1} – предел выносливости материала, соответствующий базовому числу циклов N_0 ; m – показатель степени кривой усталости.

Доля повреждений на скорости V_i

$$D_{V_i} = N_{V_i} \int_0^{\sigma_{-1}} \frac{\sigma^m f_{V_i}(\sigma) d\sigma}{\sigma_{-1}^m N_0};$$

$$D_{V_i} = \frac{N_{V_i} \sigma_{энV_i}^m}{N_0 \sigma_{-1}^m}.$$

Если повреждение D_{V_i} наносится при числе циклов $N_{V_i} = N_0$, то

$$D_{V_i} = \frac{\sigma_{энV_i}^m}{\sigma_{-1}^m},$$

где $\sigma_{энV_i}^m$ – величина установившихся переменных напряжений, приведенных к базовому числу циклов, эквивалентных по повреждающему действию всему спектру динамических напряжений при скорости V_i :

$$\sigma_{энV_i}^m = N_{V_i} \int \frac{\sigma^m f_{V_i}(\sigma) d\sigma}{N_0}.$$

Амплитуда установившегося эквивалентного режима напряжений, действующих во всем диапазоне значений эксплуатационной скорости:

$$\sigma_a = \sqrt[m]{\sum_{V=0}^{V_{\max}} \sigma_{энV_i}^m}.$$

Распределение амплитуд, полученных методом «дождя», может быть описано гамма-распределением с плотностью

$$f(x) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x},$$

где α, λ – параметры формы и масштаба, соответственно; $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция.

Величина

$$\sigma_{энV_i}^m = \frac{N_{V_i}}{N_0} \int_0^{\sigma_{-1}} \frac{\sigma^m \lambda^\alpha \sigma^{\alpha-1} e^{-\lambda \sigma} d\sigma}{\Gamma(\alpha)} = \frac{N_{V_i} \lambda^\alpha}{N_0 \Gamma(\alpha)} \int_0^{\sigma_{-1}} \sigma^{m+\alpha-1} e^{-\lambda \sigma} d\sigma = \int_0^{\sigma_{-1}} x^n e^{-\alpha x} dx = \frac{\Gamma(n+1)}{a^{(n+1)}} = \frac{N_{V_i} \lambda^{\alpha_i} \Gamma(m+\alpha_i)}{N_0 \lambda_{V_i}^{m+\alpha_i} \Gamma(\alpha_{V_i})} = \frac{N_{V_i} \Gamma(m+\alpha_{V_i})}{N_0 \lambda_{V_i}^m \Gamma(\alpha_{V_i})}.$$

Интеграл выражается через гамма-функцию [2].

Число циклов наработки на скорости V_i выражается через эффективную частоту f_i и время работы поезда на скорости V_i в процессе эксплуатации:

$$N_{V_i} = T_c f_i, \quad T_{V_i} = T_c p_{iV_i},$$

где T_c – время эксплуатации подвижного состава, с; p_{iV_i} – доля времени, приходящаяся на эксплуатацию со скоростью V_i .

Время эксплуатации

$$T_c = \frac{3600 * T * L}{V_{cp}},$$

где T – срок службы, годы; L – среднегодовой пробег, км; V_{cp} – средняя скорость движения, км/ч.

Тогда

$$\sigma_{энV_i}^m = \frac{T_c f_i p_{iV_i} \Gamma(m+\alpha_i)}{N_0 \lambda_{V_i}^m \Gamma(\alpha_i)};$$

$$\sigma_a = \sqrt[m]{\sum_{V=0}^{V_{\max}} \frac{\sigma_{ад}^m f_i K_{ш} \Gamma(m+\alpha_i) p_{iV_i}}{\Gamma(\alpha_i) \varphi_i}}.$$

Таким образом, для оценки усталостной прочности конструкций подвижного состава при схематизации случайных процессов динамических напряжений методом «дождя» необходимо использовать приведенную формулу для определения амплитуды эквивалентных напряжений, где учтена структура процессов. ■

Литература

- ГОСТ 25.101-83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.
- Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ. М., 1981.