

НАИБОЛЕЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО

Использование распределения Вейбулла при оценке нагруженности несущих деталей мобильных машин

Технический прогресс в автомобилестроении тесно связан с совершенствованием методов и средств расчетов и испытаний автомобилей, их деталей, узлов и агрегатов. Современное состояние вопроса характеризуется непрерывно растущим применением сервогидравлического оборудования с управлением от ЭВМ, использованием современной быстродействующей вычислительной техники и программного обеспечения. Это позволяет воспроизводить в лабораторных условиях полный спектр случайных нерегулярных нагрузок, которые действуют на машины в эксплуатации. Характерной особенностью анализируемых случайных процессов является их сложная структура. При анализе результатов измерений, полученных непосредственно при регистрации в типовых условиях эксплуатации, возникает необходимость в их упорядочении в удобном для последующего анализа и использования виде. При этом на первый план выдвигается решение методических вопросов: выбор способа и длительности регистрации нагруженности, выбор методов схематизации и преобразования данных о нагруженности. Вопросы схематизации эксплуатационных процессов нагружения подробно изложены в [1]. Исследования эксплуатационных процессов нагружения [2 - 5] несущих деталей мобильных машин показали, что они являются нестационарными случайными процессами. Многочисленные измерения, результаты их обработки позволили сделать следующие выводы: на коротких участках дорог (протяженностью 500...2000 м) процесс нагружения ведет себя как нормальный стационарный случайный процесс; обработка более длинных участков показала, что подбор определенного закона распределения для описания плотности распределения вероятностей является затруднительным. Применение различных распределений не дало соответствия с экспериментальными данными; провер-



В. ШОЛОМИЦКИЙ,
кандидат технических наук

ка реализаций различной протяженности выявила, что они не принадлежат к одной генеральной совокупности с определенным законом распределения, а фактический процесс нагружения представляет собой сумму случайных процессов, отличающихся параметрами; распределение, соответствующее квазистационарному случайному процессу, стабилизируется при движении по одному типу покрытия при пробегах 60...120 км (в зависимости от типа дорожного покрытия).

Обработка данных измерений включает в себя подготовку процессов нагружения к схематизации, непосредственно схематизацию, приведение асимметричных циклов нагружения к определенному (заданному) коэффициенту асимметрии и формирование вариационных рядов амплитуд приведенных напряжений, статистический анализ вариационных рядов, формирование режимов испытаний. Ниже приводится обоснование использования распределения Вейбулла для описания вариационного убывающего ряда амплитуд приведенных напряжений стационарных участков и анализ изменения его параметров.

Для последующего использования при испытаниях записанный в условиях эксплуатации случайный процесс заменяется схематизированным с получением эмпирического распределения нагрузок. Для удобства анализа требуется переход к эквива-

лентному по повреждению распределению с постоянными характеристиками асимметрии. Приведение выделенных полуциклов к эквивалентным с амплитудой σ_i (с заданным коэффициентом асимметрии $r_{зад}$) осуществляется с помощью следующих зависимостей:

$$\sigma_i = \sigma_{\max i} \cdot A - B \cdot \sigma_{-1}$$

$$A = \frac{V_2 + (V_2 - V_1) \cdot r_{зад}}{V_2 + (V_2 - V_1) \cdot r_i} \quad (1)$$

$$B = \frac{1}{1 - \frac{(1-\psi)(1+r_{зад})}{2}} - \frac{A}{1 - \frac{(1-\psi)(1+r_i)}{2}}$$

где r_i - коэффициент асимметрии выделенного цикла;

$\sigma_{\max i}$ - максимальное напряжение выделенного цикла;

$r_{зад}$ - коэффициент асимметрии, к которому осуществляется приведение;

ψ - коэффициент чувствительности к асимметрии нагружения;

$V_{1,2}$ - параметры угла наклона кривой усталости при $r=-1$ и $r=0$.

Зависимости (1) получены из уравнения кривой усталости [6], при этом предполагается, что V линейно зависит от r , а параметр кривой усталости $V_0 = \text{const}$ и не зависит от коэффициента асимметрии.

С целью оценки закона распределения, проводился анализ гистограмм, частот и полигонов частот распределения напряжений, полученных по результатам измерений на несущих деталях в условиях эксплуатации и автополигона НАМИ: картер ведущего моста, рама, кабина и задняя ось прицепа автомобилей МАЗ, рама и балки мостов БелАЗ, рычаг задней подвески автомобиля ВАЗ. Было обработано более 1000 участков дорог для автомобилей МАЗ, более 550 участков дорог для автомобилей ВАЗ, более 100 участков дорог в карьерах для автосамосвалов БелАЗ.

В качестве предполагаемого закона распределения использова-

лись следующие: нормальный, лог-нормальный, χ^2 - распределение, распределение Стьюдента, экспоненциальное, Рэлея, Бернулли, биномиальное, геометрическое, Пуассона, Эрмита, γ - распределение, β - распределение, Вейбулла. Результаты моделирования, обработки и расчетов по различным критериям показали, что необходимо использовать распределение Вейбулла (рис.1, 2).

При описании распределения приведенных амплитуд для автомобилей деталей использовано [3,5]

где m_x, m_y, D_x, D_y - математическое ожидание и дисперсия величин

$$x_i = \sigma_i^m \text{ и } y_i = \ln \frac{n_{\text{бн}} + 1}{n_i};$$

Для уравнения (3) параметры определяются из соотношений:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{D_\sigma} / C_m.$$

$$\hat{\sigma} = m_\sigma - \tilde{\sigma} \cdot b_m.$$

$$b_m = \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (5),$$

(рис. 3). Предпочтение следует отдавать форме записи (2), которая дает более близкие максимальные значения, т.к. параметры распределения вычисляются с учетом статистических характеристик не только наблюдаемой величины x_i , но и величины y_i , характеризующей размер вариационного ряда и порядковый номер n_i напряжения σ в этом ряду.

Проводилась оценка влияния параметров распределения Вейбулла на уровень максимальных напряжений и характер распределения. Результаты моделирования

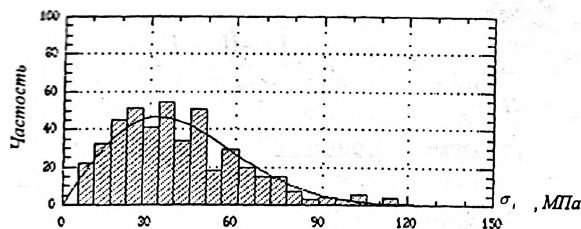


Рис.1. Полигон частот распределения амплитуд приведенных напряжений:

(...) - наблюдаемые значения;
(-) - распределение Вейбулла.

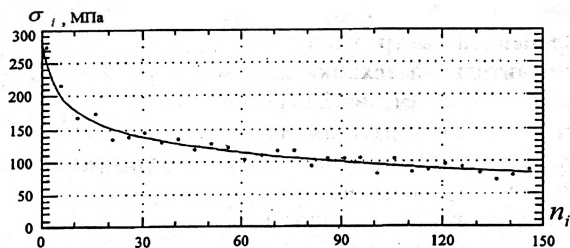


Рис.2. Вариационный ряд амплитуд приведенных напряжений:

(...) - наблюдаемые значения;
(-) - распределение Вейбулла.

трехпараметрическое уравнение Вейбулла в виде

$$\frac{n_i}{n_{\text{бн}} + 1} = \exp\left(-\frac{\sigma_i^m - \sigma_0^m}{\sigma_c^m}\right) \quad (2) \text{ или}$$

$$\frac{n_i}{n_{\text{бн}} + 1} = \exp\left[-\left(\frac{\sigma_i - \tilde{\sigma}}{\hat{\sigma}}\right)^m\right] \quad (3),$$

где $n_{\text{бн}}$ - число значений в вариационном ряду;

n_i - порядковый номер σ_i в убывающем вариационном ряду;

σ_0, σ_c - параметры распределения;

m - показатель степени распределения Вейбулла;

$\tilde{\sigma}, \hat{\sigma}$ - параметры распределения.

На каждом участке регистрации в типовых условиях эксплуатации оценивались параметры распределения: m, σ_0, σ_c и $m, \tilde{\sigma}, \hat{\sigma}$. Для уравнения (2) параметры определяются из соотношений:

$$\sigma_0 = m_x - 2,3 \sigma_c m_y$$

$$\sigma_c = \frac{1}{2,3\rho} \cdot \frac{\sqrt{D_x}}{\sqrt{D_y}} \quad (4),$$

$$C_m = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - b_m^2}$$

где m_σ, D_σ - математическое ожидание и дисперсия величин σ_i .

Показатель степени распределения Вейбулла определяется из уравнений

$$g_m = \mu_3 / \mu_2^{3/2} \quad (6),$$

где $\Gamma(\dots)$ - Γ -функция,

μ_2, μ_3 - второй и третий центральные моменты величины σ_i .

В таблице представлены результаты оценки параметров распределения Вейбулла для условий эксплуатации. Сравнение двух различных форм записи уравнения показало, что отличия в получаемых распределениях амплитуд приведенных напряжений незначительны (в пределах 3...5%) и наблюдаются в области максимальных наблюдаемых значений

показали, что изменение параметра « σ_0 » (параметр сдвига) - минимального значения напряжения в вариационном ряду - несущественно влияет на распределение нагрузок и на уровень максимальных значений. Так, например, 5...10 кратное изменение значения параметра приводит к отличию на 5...7% по уровню максимального значения напряжения в блоке.

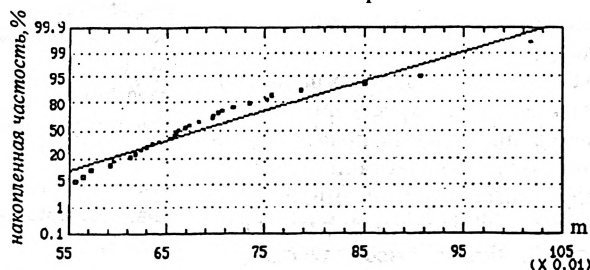


Рис.3. Вариационный ряд амплитуд приведенных напряжений:

(...) - распределение Вейбулла в записи (3);
(-) - распределение Вейбулла в записи (2).

Изменение показателя степени распределения Вейбулла « m » наблюдается в небольших пределах. Крайние значения параметров характерны для участков, содержащих небольшое число повреждающих напряжений, т.е. не являются опре-

Диапазон изменения параметров распределения Вейбулла

Условия движения	Значения параметра												
	картер заднего моста МАЗ			задняя ось прицепа МАЗ			рама БелАЗ			соединитель рычага задней подвески ВАЗ			
	m	σ_0	σ_e	m	σ_0	σ_e	m	σ_0	σ_e	m	σ_0	σ_e	
Асфальт	0,62-0,8	2,1-6,8	0,45-3,2	0,67-0,8	4,37-7,94	2-2,8	—	—	Таблица	—	0,5-1,58	2,7-33,2	0,6-45,8
Булыжник	0,62-0,78	4,1-8,5	0,55-4,2	0,7-0,78	2,7-5,7	1,8-7,2	—	—	—	—	0,74-1,32	9,42-56,3	2,2-54,6
Грунт	0,65-0,78	4,9-10,6	0,63-6,4	0,62-0,77	3,9-9,0	1,3-5,5	—	—	—	—	—	—	—
Карьер	—	—	—	—	—	—	0,99-1,99	9,8-44	27-116,3	—	—	—	—
городские условия движения	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5-1,43	2,82-37,8	0,8-30,1
Пригородный маршрут	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5-1,41	2,4-21,5	0,96-25,9

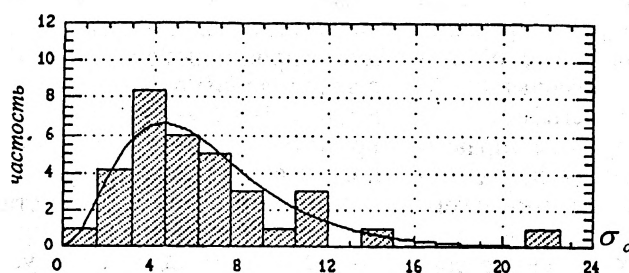


Рис. 4. Накопленные частоты показателя степени «m» распределения Вейбулла: (...) - наблюдаемые значения; (-) - нормальное распределение.

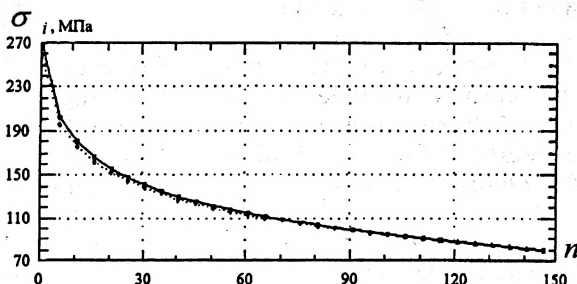


Рис. 5. Полигон частот параметра « σ_e » распределения Вейбулла: (...) - наблюдаемые значения; (-) - χ^2 -распределение.

деляющими при оценке вида и закона распределения. Изменение параметра « σ_e » (параметр формы распределения) оказывает наиболее существенное влияние.

Проводилась оценка закона распределения параметров распределения Вейбулла «m» и « σ_e ». Результаты обработки показали, что изменение параметра «m» достаточно точно описывается нормальным законом распределения, а изменение параметра « σ_e » - модифицированным χ^2 -распределением Пирсона (рис. 4, 5).

Таким образом, дорожные и полигонные испытания автомобилей показали, что использование функции распределения Вейбулла является наиболее предпочтительным для описания нагруженности несущих деталей автомобиля, а представление случайного процесса нагружения в виде квазистационарного

с использованием χ^2 -распределения Пирсона для описания изменения параметра σ_e и нормального закона распределения для опи-

сания изменения показателя степени распределения «m» хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Литература:

1. ГОСТ 25.101-83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. - М.: Изд. Стандартов. 1983.-30 с.
2. Шоломицкий В.И., Ракицкий А.А., Горбачевич М.И. Оценка процессов нагружения несущих конструкций транспортных машин // Известия АН БССР - Сер. физ.-техн. наук. 1986. № 4. С.86-89.
3. Шоломицкий В.И. Автоматизированное формирование программ ускоренных испытаний и прогнозирование ресурса балок осей автомобилей в заданных условиях эксплуатации. - Дисс. на соиск. ученой степени канд. техн. Наук. Минск: 1988. - 189 с.
4. Высоцкий М.С., Шоломицкий В.И. Ресурс несущих деталей автомобиля. Оценка на стадии проектирования // Автомобильная промышленность. 1999. №12. С.21-25.
5. Шоломицкий В.И. Анализ параметров распределения Вейбулла при оценке нагруженности несущих деталей мобильных машин // Наука производства. 1999. № 10. С. 49-51.
6. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностики усталости деталей машин. - Мн.: Наука и техника. 1983. - 246 с.