

УДК 620.169.1 + 629.113.001.2

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОГРАММ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ИСПЫТАНИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА РЕСУРС

Л.А. Шефер

В статье рассматривается методика определения уровня нагружения несущей системы конструкции при проведении стендовой отработки на ресурс в условиях случайного узкополосного или гармонического нагружения, имитирующего реальные условия эксплуатации.

Ключевые слова: случайное нагружение, обобщенная диаграмма усталости, накопленное повреждение, эквивалентный режим.

В ходе эксплуатации несущие элементы конструкций автомобилей и перевозимых изделий подвергаются длительному воздействию вибрационных нагрузок. Как правило, нагрузки носят случайный характер и могут быть осложнены наложением гармонических и полигармонических составляющих. Действие вибраций в процессе эксплуатации в нагруженных элементах конструкции может приводить к качественным изменениям, большинство из которых носит усталостный характер. В свою очередь, качественные изменения в ответственных элементах изделий (например, несущих элементах силовой схемы) могут привести к отказам и разрушению элементов, что может привести к разрушению конструкции, гибели экипажа, пассажиров и грузов, к невыполнению поставленной хозяйственной задачи.

Существующие методы статистической динамики дают возможность оценить нагруженность конструкций в заданных сечениях и элементах, позволяя при известных случайном воздействии на исследуемую конструкцию и динамических параметрах конструкции, как колебательной системы, вычислять статистические характеристики на ее выходе в виде спектральных плотностей ускорений, перемещений, напряжений и других параметров случайных процессов.

Статистические характеристики нагруженности элементов конструкций в том или ином виде должны быть сопоставлены с предельным состоянием, которое для циклического воздействия определяется соответствующими характеристиками сопротивления усталости лабораторных образцов материалов и деталей. Сопоставление производится с помощью методов суммирования усталостных повреждений, которые определяют ресурс и запасы прочности. Как правило, эти методы связаны с представлением реальных процессов в виде совокупности условных амплитуд нагружения (схематизация процесса) и применения к ним линейного суммирования усталостных повреждений. При этом погрешности расчетов на усталость и присущий им разброс результатов (по долговечности до 10 раз и более) требуют отработки элементов конструкций на эксплуатационные нагрузки.

Создание конструкций, обладающих высокой надежностью при минимальных запасах прочности вызывает необходимость установления достаточно жесткого критерия повреждения. В качестве такого критерия обычно принимают момент зарождения макротрещины в материале элементов конструкции.

Расчетная оценка накопленного повреждения в ходе циклического нагружения и определение момента достижения предельного состояния (появления макротрещины) предусматривают использование определенной гипотезы суммирования повреждений.

Наиболее универсальной и широко применяемой, из разработанных в настоящее время гипотез накопления усталостных повреждений [1–4] является линейная гипотеза, которая применительно к случайным и другим видам процессов, описывается зависимостью

$$P = \sum_{i=1}^k \frac{n_{0i}(\sigma_m, S_i, G_i)}{N_{0i}(\sigma_m, S_i, G_i)} = 1, \quad (1)$$

где P – накопленное в ходе эксплуатации повреждение; $n_{0i}(\sigma_m, S_i, G_i)$ – число условных циклов (число нулей с заданным знаком производной) случайного или другого эксплуатационного процесса, соответствующего режиму нагружения с параметрами σ_m, S_i, G_i . Где σ_m – математическое ожидание напряжений процесса (среднее значение); S_i – среднее квадратичное отклонение (СКО) напряжений; G_i – обобщенный критерий, отражающий вероятностную структуру процесса нагружения:

$$G = \frac{S_{ms} n_s \sigma_{\max}}{S_m n_m S},$$

где S_{ms} – среднее квадратическое отклонение повреждающих максимумов (максимумов, лежащих выше уровня $\sigma_{\min} = S$); n_s – среднее число повреждающих максимумов; σ_{\max} – максимальный выброс напряжений процесса, соответствующий заданной вероятности (например, $P = 0,997$); S_m – среднее квадратическое отклонение положительных максимумов процесса, n_m – среднее число положительных максимумов процесса.

$N_{0i}(\sigma_m, S_i, G_i)$ – предельное состояние, определяемое по обобщенной диаграмме усталости [4]:

$$\lg N_{0ig\mu} = A'_\Gamma - B \lg \left\{ Q_i^{\frac{2}{B}} \left[\frac{Q_i(1 + \psi_S \mu) \alpha_\sigma}{(Q_i \pm t_q v_{SG}) K_\sigma} S_{i\mu} - S_0 \right] \right\}, \quad (2)$$

где $A'_r = A_r - B \lg \sqrt{2}$; A_r , B – параметры обобщенной диаграммы усталости; $Q_i = \left(\frac{G_0 - G_r}{G_0 - G_i} \right)^{\frac{B}{2}}$ – коэффициент, учитывающий изменение СКО расщепления долговечностей в зависимости от структуры процесса, очевидно, что для гармоники $Q_i = 1$; ψ_s – коэффициент чувствительности материала к асимметрии нагружения; $\mu = \sigma_m / S_\mu$ – коэффициент асимметрии процессов; S_μ – СКО напряжений асимметричного процесса нагружения, α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений; коэффициент K_σ является комплексным и отражает влияние на математическое ожидание пределов ограниченной выносливости детали масштабного фактора, концентрации напряжений и вида нагружения в их совокупности; t_q – квантиль заданной вероятности неразрушения; v_{sr} – коэффициент вариации; S_0 – предел неограниченной выносливости, выраженный в СКО напряжений.

В качестве критерия эквивалентности рассматривается равенство накопленного повреждения от суммы эксплуатационных случаев и режимов нагружения с повреждением, накопленным от действия эквивалентного режима.

Накопленное в условиях эксплуатации усталостное повреждение от действия совокупности i случаев и j режимов нагружения:

$$\Pi = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \frac{n_{0ij}(\sigma_{mij}, S_{ij}, G_{ij})}{N_{0ij}(\sigma_{mij}, S_{ij}, G_{ij})}. \quad (3)$$

Повреждение от эквивалентного режима:

$$\Pi_3 = n_{03} / N_{03},$$

где n_{03} – число циклов, накопленное на эквивалентном режиме, N_{03} – предельное число циклов эквивалентного режима.

Накопленное на каждом случае и режиме эксплуатации число циклов:

$$n_{0ij} = f_{eij} \xi_{ij} T, \quad (4)$$

где f_{eij} – эффективная частота процесса для i -го случая и j -го режима;

$\xi_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{T}$ – доля времени действия i -го случая и j -го режима, τ_{ij} – время действия i -го случая и j -го режима, T – период эксплуатации:

$$T = \sum_i \sum_j \tau_{ij}. \quad (5)$$

Предельное число циклов для каждого i -го случая и j -го режима определяется из уравнения обобщенной диаграммы усталости:

$$N_{0ij} = \frac{10^{A_r'}}{Q_{ij}^2 \left(K_{ij} S_{ij} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B}, \quad (6)$$

где $K_{ij} = \frac{Q_{ij} (1 + \psi_s \mu_{ij})}{Q_{ij} \pm t_q \nu_{sij}}$.

Тогда накопленное при эксплуатации повреждение может быть представлено:

$$\Pi = \frac{T}{10^{A_r'}} \sum_i \sum_j f_{eij} \xi_{ij} Q_{ij}^2 \left(K_{ij} S_{ij} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B. \quad (7)$$

Накопленное число циклов эквивалентного режима $n_{0э}$ определяется для того же срока эксплуатации T :

$$n_{0э} = T f_{э}.$$

Здесь $f_{э}$ – эффективная частота при эквивалентном нагружении.

Накопленное повреждение на эквивалентном режиме:

$$\Pi_э = f_{э} T / N_{0э}.$$

На основе равенства накопленных при эксплуатации и на эквивалентном режиме повреждений для элемента конструкции будем иметь:

$$\frac{f_{э} T}{N_{0э}} = \frac{T}{10^{A_r'}} \sum_i \sum_j f_{eij} \xi_{ij} Q_{ij}^2 \left(K_{ij} S_{ij} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B.$$

В свою очередь, по обобщенной диаграмме усталости можно вычислить предельное число циклов эквивалентного режима:

$$N_{0э} = \frac{10^{A_r'}}{Q_э^2 \left(K_э S_э \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B}, \quad (8)$$

где $S_э$ – СКО напряжений эквивалентного по накопленному повреждению режима нагружения; $K_э$ – коэффициент уравнения, аналогичный по составу коэффициенту K_{ij} :

$$K_э = \frac{Q_э (1 + \psi_s \mu_э)}{Q_э \pm t_q \nu_{sэ}}. \quad (9)$$

Если принимать эквивалентный режим симметричный, то $\mu_э = 0$.

Структурный коэффициент эквивалентного режима:

$$Q_3 = \left(\frac{G_0 - G_r}{G_0 - G_3} \right)^{\frac{B}{2}}. \quad (10)$$

Приняв в качестве эквивалентного режима наиболее повреждающий узкополосный процесс, имеющий коэффициент структуры $G_3 = 2,562$, получим значение $Q_3 = 1,754^{B/2}$.

Если в качестве эквивалентного процесса принять гармоническое нагружение, для которого $G_3 = G_r = 1,414$, то коэффициент $Q_3 = 1$, а формула для коэффициента K_3 с учетом $\mu_3 = 0$ примет вид:

$$K_3 = \frac{1}{1 \pm t_q \nu_{sr}}.$$

Подставив значение предельного числа циклов эквивалентного режима N_{03} в формулу равенства режимов, получим:

$$Q_3^2 \left(K_3 S_3 \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B = \frac{1}{f_{e3}} \sum_{i=1} \sum_{j=1} f_{eij} \xi_{ij} Q_{ij}^2 \left(K_{ij} S_{ij} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B.$$

Отсюда получаем выражение для значения СКО напряжений эквивалентного режима:

$$S_3 = \frac{1}{K_3} \left[\frac{1}{Q_3^2 f_{e3}} \sum_{i=1} \sum_{j=1} f_{eij} \xi_{ij} Q_{ij}^2 \left(K_{ij} S_{ij} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B \right]^{\frac{1}{B}} \frac{K_\sigma}{\alpha_\sigma} + \frac{S_0 K_\sigma}{K_3 \alpha_\sigma}. \quad (11)$$

Если в ходе изменения случаев и режимов нагружения не происходит изменения эффективной частоты процесса, т.е. $f_{e3} = f_{eij} = f_e$, а также не меняется коэффициент структуры процесса G_{ij} и обеспечивается равенство $G_{ij} = G_3$; $Q_{ij} = Q_3 = Q$, то формула для определения S_3 может быть упрощена:

$$S_3 = \frac{1}{K_3} \left[\sum_{i=1} \sum_{j=1} \xi_{ij} \left(K_{ij} S_{ij} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B \right]^{\frac{1}{B}} \frac{K_\sigma}{\alpha_\sigma} + \frac{S_0 K_\sigma}{K_3 \alpha_\sigma}. \quad (12)$$

При равной величине коэффициент асимметрии процессов нагружения $\mu_{ij} = \mu_3 = \mu$, коэффициенты $K_{ij} = K_3 = K$, а СКО напряжений эквивалентного режима:

$$S_3 = \frac{K_3}{\alpha_\sigma} \left[\sum_{i=1} \sum_{j=1} \xi_{ij} \left(S_{ij} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} - S_0 \right)^B \right]^{\frac{1}{B}} + \frac{S_0 K_\sigma}{K_3 \alpha_\sigma}. \quad (13)$$

Для вероятности неразрушения $P = 0,5$ определим среднее значение СКО напряжений эквивалентного режима \bar{S}_3 и среднее значение долговечности.

По полученным формулам могут быть вычислены частные запасы для каждого случая и режима, а также текущее значение запаса прочности по мере нагружения конструкции.

В зависимости от поставленной задачи, по приведенным формулам могут быть оценены запасы прочности для различных вероятностей разрушения, при этом для $P = 0$ получим минимальное значение запаса прочности, а для $P \rightarrow 0,997$ – максимальное.

Полученные зависимости для эквивалентных режимов позволяют предложить следующий порядок формирования программ стендовых испытаний разрабатываемых, существующих и модернизируемых конструкций.

Рассматриваются назначение разрабатываемого автомобиля, условия и типы дорог эксплуатации, номинальные скорости движения, предполагаемый ресурс эксплуатации.

В зависимости от имеющегося на предприятии оборудования, для проведения испытаний на ресурс, определяется вид реализуемого испытательным стендом процесса нагружения объекта (реальный случайный для различных типов дорог, эквивалентный случайный узкополосный или эквивалентный гармонический).

Исходя из опыта проектирования, выбирают программу испытаний и устанавливают, будет имитироваться каждый тип дорог, и оцениваться доля повреждения вносимого каждым из них до наступления повреждения, или определяться общий, суммарный ресурс до выхода несущих систем автомобиля из строя.

На основании конструкторских разработок и расчетов нагруженности несущих конструкций вычисляются параметры, входящие в зависимость (11), с помощью которой вычисляются параметры стендового нагрузочного процесса (или процессов) в соответствии с выбранной программой.

Подбирается частотный диапазон (или частота гармоника) реализуемых процессов (или процесса). При этом желательно работать в частотном диапазоне колебаний объекта при эксплуатации. Несмотря на то, что частота процесса нагружения мало влияет на долговечность, изменение частотного диапазона нагружения (которое часто проводят в сторону увеличения для сокращения времени испытаний) может приводить к возникновению вибраций и резонансных явлений не характерных для эксплуатации, что, в свою очередь, может привести к существенному искажению результатов испытаний на ресурс.

В зависимости от решений, принятых по указанным выше пунктам, оценивается по формуле (8) число циклов эквивалентного режима до повреждения испытываемого объекта с учетом рассеивания, учитываемого параметром K_3 .

В перечень контролируемых параметров испытаний объекта должны быть включены параметры, определяющие воздействие стенда на испытываемый объект, по которым оценивается точность и полнота реализуемой программы нагружения.

Библиографический список

1. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 311 с.
2. Гусев, А.С. Расчет конструкций при случайных воздействиях / А.С. Гусев, В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.
3. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжений переменных во времени / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
4. Шефер, Л.А. Вероятностные методы расчета ресурса и запасов прочности несущих элементов конструкций транспортных систем / Л.А. Шефер. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 250 с.