

УДК 502/504:631.3.004

**В. Н. ОРЛОВ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

*Эксплуатационная нагруженность характеризуется совокупностью статистических показателей процессов, происходящих в машине, ее системах, агрегатах, сборочных единицах и в деталях при рядовой эксплуатации и типичных перегрузках во всех природно-климатических зонах, для которых машина предназначена.*

*Эксплуатационная нагруженность, рядовая эксплуатация машин, типичные перегрузки, оценка заданного уровня надежности деталей машин.*

*The operational loading is characterized by a set of statistical indicators of the factors occurring in the machine, its systems, aggregates, mounted units and in parts during the ordinary exploitation and typical overloading in all the natural – climatic zones for which this machine is designed.*

*Operational loading, machine ordinary operation, typical overloading, assessment of the given level of reliability of the machine parts.*

Экспериментально-расчетный прогноз уровня физической надежности наиболее эффективен на стадиях изготовления опытных образцов машины. Исследованиям подвергается не только готовая конструкция, но и ее образец, в который закладывается технология производства с ее дефектами изготовления и сборки, свойственными для данного производства. Общая схема проведения прогноза представлена на рисунке.

Как видно из рисунка, прогноз реализован расчетными методами, но данные для расчетов получены экспериментальным путем. База экспериментальных исследований содержит данные эксплуатационной нагруженности деталей (силовые факторы, напряженно-деформируемое состояние), полученные, как правило, электротензометрированием, и характеристики предельных состояний деталей ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_{-1q}$  и др.).

*Положительным моментом* такого прогноза является его относительно высокая точность оценок – погрешность по долговечности, как правило, не превышает 15...20 %, *отрицательным моментом* – необходимость изготовления



**Схема оценки заданного уровня надежности деталей машины расчетно-экспериментальными методами**

экспериментального образца машины, что отражается на сроках ввода в серийное производство машины и стоимости проведения такого рода прогноза.

*Экспериментальные исследования машины во всех типичных режимах работы.* На основе оценки загруженности машины по режимам эксплуатации с помощью информационно-измерительных систем (ИИС) проводят исследования эксплуатационной нагруженности машины в целом и отдельных ее деталей во всех типичных режимах работы.

Эксплуатационная нагруженность характеризуется совокупностью статистических показателей процессов, происходящих в машине, ее системах, агрегатах, сборочных единицах и в деталях при рядовой эксплуатации и типичных перегрузках во всех природно-климатических зонах, для которых машина предназначена [1].

Доля типового режима в общем объеме эксплуатации парка машин

$$a_i = \frac{t_i}{\sum t_i}; \sum a_i = 1,$$

где  $t_i$  – суммарное время эксплуатации машины в  $i$ -м режиме.

*Эксплуатационное нагружение машины и деталей.* Эксплуатационные нагрузки вызывают в деталях случайные напряжения. Спектральные плотности случайных процессов, характеризующих напряженно-деформированное состояние конструкции, являются не только комплексной характеристикой самой системы и действующих нагрузок, но и исходной информацией для прогнозирования долговечности. При записях процессов, характеризующих эксплуатационную нагруженность машины, фиксируются внешние воздействия.

Формирование нагрузок основывается на статистическом материале экспериментальных исследований образцов машины. Достоверность статистических оценок зависит от продолжительности наблюдения (записи) процессов. Обработка записей аналоговых сигналов датчиков (тензоэлементов) проводится с учетом цели дальнейших исследований:

для оценки прочности и жесткости (экспериментальное нагружение) или для оценки выносливости (случайный эксплуатационный процесс нагружений) [2]. Для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции в экстремальных условиях рассматривается нагружение в единый момент времени. Для этого на синхронизированных записях определяют величины напряжений или деформаций, изменяющихся во времени в наиболее неблагоприятных сочетаниях. Оценивают вероятность возникновения перегрузок в данном режиме эксплуатации.

*Оценка выносливости.* Оценка выносливости базируется на скорректированной линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений Серенсена–Когаева.

При исследовании выносливости конструкций, изготовленных из сталей малой и средней прочности ( $\sigma_b < 1300$  МПа), без воздействий агрессивной среды и при нормальной температуре, медианные кривые усталости (соответствующие  $P = 50\%$  неразрушения) имеют горизонтальные участки, соответствующие неограниченным пределам выносливости:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_a^m N = \bar{\sigma}_{-1g}^m N_G; N \leq N_G \\ N = \infty, N > N_G, \end{cases}$$

где  $\bar{\sigma}_a$  – среднее значение амплитуд напряжений;  $m$  – показатель угла наклона левой ветви кривой усталости;  $N$  – число циклов амплитуд;  $\bar{\sigma}_{-1g}$  – медианное значение предела выносливости натурной детали;  $N_G$  – абсцисса точки перелома кривой усталости.

Поскольку нагруженность представляется в виде гистограммы, то медианная долговечность для этого ступенчатого распределения амплитуд напряжений определяется по выражению

$$\bar{N} = \frac{a_p \bar{\sigma}_{-1g}^m N_G}{\sum \bar{\sigma}_{ai}^m p_i} \text{ при } \sigma_{ai} > \sigma_{-1g},$$

где  $a_p$  – расчетная сумма относительных долговечностей;  $\sigma_{ai}$ ,  $\bar{\sigma}_{ai}$  – случайные и средние значения амплитуды напряжений  $i$ -й степени;  $p_i$  – относительное число повторений амплитуды.

Расчетная сумма относительных долговечностей

$$a_p = \frac{\bar{\sigma}_{amax} \xi - 0,5 \bar{\sigma}_{-1g}}{\bar{\sigma}_{amax} - 0,5 \bar{\sigma}_{-1g}}.$$

Корректировочная функция

$$\xi = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^r \frac{\bar{\sigma}_{ai}}{\bar{\sigma}_{amax}} p_i,$$

где  $A = \sum_{i=1}^r p_i$ ;  $r$  – порядковый номер амплитуды, при которой  $\bar{\sigma}_{ar} > 0,5\bar{\sigma}_{-1g}$  и  $\bar{\sigma}_{ar+1} > 0,5\bar{\sigma}_{-1g}$ .

Медианная долговечность для непрерывного распределения амплитуд напряжений

$$\bar{N} = a_p \bar{\sigma}_{-1g}^m N_G \left[ \int \sigma_a^m f(\sigma_a) d\sigma_a \right]^{-1}.$$

Значения параметров кривых усталости и их коэффициента вариации определяются экспериментально или расчетом.

Двумерное распределение амплитуд напряжений  $\sigma_a$  и средних (статических) значений  $\sigma_m$  может быть сведено к одномерному распределению эквивалентных амплитуд:

$$\sigma_{эkv} = \sigma_a + \psi_\alpha \sigma_m,$$

где  $\psi_\alpha$  – коэффициент чувствительности материала к асимметрии нагрузжений (для малоуглеродистых сталей  $\psi_\alpha \approx 0,2$ ).

Средний ресурс (в часах работы)

$$T = \frac{\bar{N}}{3600 \cdot v_{эф}},$$

где  $v_{эф}$  – эффективная частота амплитуд повреждающих напряжений (определяется как частота появления эквивалентных амплитуд напряжений  $\bar{\sigma}_{авк} > \bar{\sigma}_{-1g}$ ), Гц.

Функция распределения ресурса может быть определена в предположении, что подчиняется нормально-логарифмическому закону.

Выводы

Предлагаемый расчетный метод позволяет с высокой точностью прогнозировать уровень надежности машины и ее составных частей на всех возможных режимах эксплуатации.

Модель эксплуатационного нагружения, основанная на статистическом материале экспериментальных исследований образцов машины, позволяет оценивать такие свойства элементов конструкции, как жесткость, прочность, выносливость, несущая способность и др.

Данная методика позволяет проводить испытания машины на стадии производства опытных образцов, благодаря чему можно оперативно вносить конструктивные доработки до начала изготовления опытной партии.

1. Орлов Б. Н., Евграфов В. А. Прогнозирование усталостной долговечности деталей почвообрабатывающих машин с учетом механики разрушения // Труды Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка. – М.: ГОСНИТИ, 2009. – Т. 103. – С. 103–106.

2. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для втузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.

Материал поступил в редакцию 2.07.10.

**Орлов Борис Намсынович**, доктор технических наук, профессор

Тел. 8 (495) 976-21-61