

УДК 502/504:611.192(035)

С. С. ЧИБУХЧЯН, М. Г. СТАКЯН

Государственный инженерный университет Армении (Политехник)

В. В. ПОПОВ

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

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматривается методика оценки надежности машин и оборудования для выполнения сельскохозяйственных работ. Показано, что по сравнению с традиционными методами расчета по отдельным критериям работоспособности новая методика, основанная на интегральной оценке уровня вероятности безотказной работы, точнее характеризует несущую способность и надежность машин, позволяет минимизировать материалоемкость их конструкций. Для указанных машин дана расчетная схема новой методики.

Машина, средства механизации, надежность, вероятность безотказной работы, несущая способность, материалоемкость.

The assessment methodology of machine and equipment reliability designed for fulfilling agricultural works is considered. It is shown that compared with the traditional calculation methods on some workability criteria the new method based on integral estimate of the no-failure operation probability level more definitely characterizes a machine carrying capacity and reliability, allows to minimize material consumption of their structures. There is given an estimation scheme of a new methodology for these machines.

Machine, means of mechanization, reliability, unfailing operation probability, carrying capacity, material consumption.

Современные средства механизации сельскохозяйственных работ и природоохранных мероприятий состоят из отдельных агрегатов и комплексов взаимосвязанных устройств, механизмов, средств управления и узлов различного назначения. Благодаря научно-техническим достижениям XX века повысилась степень механизации и автоматизации сельскохозяйственных работ и процессов переработки сельскохозяйственных продуктов, снизилась материалоемкость оборудования, повысилась его производительность, возросли рабочие скорости и энерговооружение, что и привело к повышению тепло-, энерго- и механической напряженности элементов конструкции.

Низкая надежность комплексов – основная причина простоев, роста расходов на ремонт и обслуживание, нарушения ритма производственных процессов, а при непредвиденных случаях – также аварий и разрушений. В сельскохозяйственном

машиностроении расходы на ремонтные работы достигают уровня 25...30 % основных средств, расходуется до 20 % новых материалов, а примерно 25 % технологического оборудования загружено ремонтно-восстановительными работами. В этой связи целесообразно повысить требования к учету и оценке показателей надежности этих машин, совершенствовать методы их расчета, проектирования и технологии изготовления.

Рассмотрим проблему уточнения методов расчета элементов машин [1, 2]. Надежность машин и средств механизации обычно оценивается совместным учетом ряда критериев работоспособности: прочности, жесткости, износо-, тепло- и вибростойкости, точности и др. Для каждого отдельного класса и вида машин надежность рассчитывается по конкретной группе указанных критериев. При этом для каждого критерия сравниваются их расчетные и предельные характеристики

– считается, что условие работоспособности обеспечено, если разница расчетных и предельных характеристик удовлетворяет условию $Y - Y_{\text{lim}} < 0$. Как правило, указанные характеристики являются случайными величинами, подчиняющимися в основном нормальному закону распределения [3]. При средневероятной (медианной) оценке надежности можно записать, что $\bar{Y} - \bar{Y}_{\text{lim}} = 0$, а при заданном уровне вероятности безотказной работы –

$$\bar{Y} - \bar{Y}_{\text{lim}} = z_p s, \quad (1)$$

где \bar{Y} , \bar{Y}_{lim} – медианные значения расчетных и предельных характеристик; z_p – квантиль нормального распределения, соответствующий заданному уровню вероятности неразрушения $P(t_i)$; $s = \sqrt{s_Y^2 + s_{Y_{\text{lim}}}^2}$; s_Y , $s_{Y_{\text{lim}}}$ – соответственно среднеквадратические отклонения разницы $(\bar{Y} - \bar{Y}_{\text{lim}})$ и $(\bar{Y}$, $\bar{Y}_{\text{lim}})$.

Из (1) можно получить [1]:

$$\begin{aligned} z_p &= \frac{\bar{Y} - \bar{Y}_{\text{lim}}}{s} = - \frac{\bar{Y}_{\text{lim}} - \bar{Y}}{\sqrt{s_{Y_{\text{lim}}}^2 + s_Y^2}} = \\ &= - \frac{(\bar{Y}_{\text{lim}}/\bar{Y}) - 1}{\sqrt{(s_{Y_{\text{lim}}}/\bar{Y})^2 + (s_Y/\bar{Y})^2}} = \\ &= - \frac{\bar{s} - 1}{\sqrt{(\bar{s}v_{\text{lim}})^2 + v_Y^2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{s} = \bar{Y}_{\text{lim}}/\bar{Y}$ – медианное значение коэффициента безопасности для данного критерия; $v_{\text{lim}} = s_{\text{lim}}/\bar{Y}_{\text{lim}}$, $v = s_Y/\bar{Y}$ – коэффициенты вариации характеристик \bar{Y} , \bar{Y}_{lim} .

Имея значение z_p , из справочной литературы определяют уровень вероятности $P(t_i)$ (обычно при $z_p = -1,282$; $-1,645$; $-2,326$; $-3,090$ $P(t_i) = 90$; 95 ; 99 ; $99,9$ % соответственно) [3].

Поскольку для нормальной работы машины необходимо одновременно обеспечить условие (2) для каждого критерия работоспособности, согласно правилу умножения вероятностей независимых событий, уровень надежности машины рассчитывается так [1,2]:

$$P(t)_M = \prod_{i=1}^n P(t_i). \quad (3)$$

Рассмотрим расчеты по основным критериям работоспособности для сельскохозяйственных машин [4].

1. Критерий прочности. Является первостепенным из всех критериев работоспособности. Аналогично (2), для оценки вероятности безотказной работы по данному критерию получим:

$$z_p = - \frac{\bar{\sigma}_g - \bar{\sigma}_a}{\sqrt{s_g^2 + s_a^2}} = - \frac{\bar{s} - 1}{\sqrt{(\bar{s}v_g)^2 + v_a^2}}, \quad (4)$$

где $\bar{\sigma}_a, \bar{\sigma}_g$ – медианные значения расчетного и предельного напряжений, вызванных внешней нагрузкой F в опасном сечении элемента конструкции; v_a, v_g – их коэффициенты вариации; \bar{s} – медианный коэффициент запаса прочности;

$$\bar{s} = \bar{\sigma}_R K_L / \bar{\sigma}_{\text{max}}, \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_R = \bar{\sigma}_g$ – медианный предел выносливости, полученный согласно испытаниям на усталость или из справочной литературы с учетом влияния ряда факторов (масштабный эффект, концентрация напряжений, состояние рабочих поверхностей, влияние среды, вид нагружения и др.); $K_L = \sqrt{N_\Sigma/N_G}$ – коэффициент долговечности; m – показатель кривой усталости материала конструкции; $N_\Sigma = 60nt$, $N_G = 5 \cdot 10^6$ – суммарное и базовое числа циклов; $\bar{\sigma}_{\text{max}}$ – медианное значение максимально го напряжения в опасном сечении, вызванного нагрузкой \bar{F}_{max} .

Поскольку режимы нагружения машин – это временные функции, которые могут меняться случайно или детерминированно, быть непрерывными, дискретными или постоянными, величину \bar{F}_{max} в общем случае рассчитывают как эквивалентную:

$$\bar{F}_\Sigma = \bar{F}_{\text{max}} \cdot K_p,$$

где K_p – коэффициент режима, значения которого зависят от типовых режимов нагружения: тяжелого (Т), среднего равновероятного (СР), среднего нормального (СН) и легкого (Л) [1, 2].

Обоснованный учет коэффициентов вариации может значительно повысить точность прочностных расчетов. Если для пределов выносливости их значения меняются в пределах $v_{\sigma_R} = 0,06 \dots 0,09$, то для $\bar{\sigma}_{\text{max}}$ в зависимости от вида режима нагружения $v_{\sigma_{\text{max}}} = 0,06 \dots 0,25$, что должно быть учтено в расчетах.

Учет критерия прочности по традиционной схеме основан на расчетах проверочных, проектных и по несущей способности:

$$\sigma = F/A \leq [\sigma], \quad A \geq F/[\sigma], \quad F \geq A[\sigma], \quad (6)$$

где $[\sigma] = \sigma_R/s$ – допускаемое напряжение; F и A – соответственно силовой фактор и геометрический параметр конструкции (основывается на детерминированном подходе к величинам $[\sigma]$ и запаса прочности $s = 1,5 \dots 3,0$, которые в подавляющем большинстве случаев приводят к завышению значений A и, следовательно, к нерациональному использованию материала).

Опыт показывает, что при расчетах, согласно (6), материалоемкость конструкции завышена на $10 \dots 15$ %, в отдельных случаях – до 20 %, что может ограничить объемы выпуска указанных машин при

их серийном производстве.

Критерий износостойкости. Спектр процессов, вызывающих износ рабочих поверхностей деталей, в основном связан с условиями работы пар трения: контактная усталость, фреттинг-коррозия, качество смазки, наличие абразивных частиц и тепловых явлений в зоне контакта, макро- и микрогеометрия контактных поверхностей и др. Поэтому в расчетах на надежность используются интегральные характеристики трения и износа – линейный износ W и его интенсивность I :

$$W = Iv t, \quad (7)$$

где $I = h/l$, h – толщина изношенного слоя; l – путь трения; v – относительная скорость контактных поверхностей; t – время.

Оценку надежности можно выполнить двумя методами:

а) по изменению линейных параметров изношенной детали, нарушающих ее степень точности, а при больших значениях – также и прочность;

б) по изменению взаимосвязи деталей пар трения за счет увеличения зазоров в соединении, окружного шага зубчатых колес, шага цепи в цепных передачах, которые вызывают дополнительные динамические нагрузки, шум, вибрацию, потери герметичности и мощности.

Рассматривая разницу предварительной h_0 и предельной h_k величин износа и, согласно условию $(h_0 - h_k) < 0$, получают:

$$z_p = - \frac{\bar{s} - 1}{\sqrt{(\bar{s}v)^2 + v_1^2}}, \quad (8)$$

где $\bar{s} = \Delta / IVt$ – медианный коэффициент безопасности при износе; $\bar{\Delta} = (\bar{h}_0 - \bar{h}_k)$; $v_1 = s_1 / \bar{I}$; $v_\Delta = s_\Delta / \bar{\Delta}$; $s_\Delta = \sqrt{s_{h_0}^2 + s_{h_k}^2}$.

Величину \bar{I} при землянных работах рассчитывают так:

$$\bar{I} = Kp^m f^n / HRC^x, \quad (9)$$

где K – коэффициент пропорциональности; p – давление в контакте; f – коэффициент трения; HRC – число Роквелла; m, n, x – показатели, зависящие от режима трения.

Соответственно для S_1 можно записать:

$$S_1 = \sqrt{s_p^2 + s_f^2 + s_{HRC}^2}.$$

2. Критерий теплостойкости.

Уравнение теплового баланса при установленном режиме работы машины можно записать так:

$$P_f \approx P_{отв}, \quad P_f = (1 - \eta) P, \\ P_{отв} = K_t A (1 + \psi) (t_p - t_0) \quad (10)$$

где P , P_f – мощность машины и ее тепловая потеря; $P_{отв}$ – тепловая мощность, отводимая в окружающую среду; η – КПД машины; $K_t A$ – соответственно коэффициент и площадь теплопередачи машины; ψ – часть теплоты, отводимая к фундаменту; t_1, t_0 – температура машины и окружающей среды.

Оценку надежности по теплостойкости выполняют согласно условию $(t_p - t_{max}) < 0$, где t_p, t_{max} – соответственно рабочая и максимально допустимая температуры для данного класса машины (обычно для нормального режима смазки при жидкостном трении $t_{max} = 80 \dots 100$ °С).

Из уравнений (10) можно определить рабочую температуру t_p :

$$t_p \approx \frac{(1 - \eta) P}{K_t A (1 + \psi)} + t_0.$$

Поскольку величины η, P, K_t, t_0 являются случайными, то медианное значение

$$\bar{t}_p \approx \frac{(1 - \bar{\eta}) \bar{P}}{\bar{K}_t A (1 + \psi)} + \bar{t}_0.$$

Обычно t_{max} – постоянная величина, которая задается для каждого класса машины, тогда $v_{t_{max}} = 0$, и поэтому

$$z_p = - \frac{\bar{s}_t - 1}{v_t}$$

где $\bar{s}_t = t_{max} / \bar{t}_p$; $v_t = s_t / \bar{t}_p$; $s_t = \sqrt{s_p^2 + s_\eta^2 + s_k^2 + s_{t_0}^2}$.

Особенностью и преимуществом данной методики является совместный учет разнохарактерных критериев работоспособности по единому принципу: вычислить вероятность безотказной работы по каждому критерию и на этой основе выполнить интегральную оценку надежности механической системы в целом и за весь срок ее службы. Учет показателей рассеяния основных расчетных параметров позволяет повысить достоверность выполненных расчетов и достичь минимальной материалоемкости конструкций, а также прогнозировать возможный объем ожидаемых ремонтно-восстановительных работ. Уточнение указанных показателей (дисперсия циклических долговечностей, статистические параметры кривой усталости, мера индивидуального рассеяния данных вокруг центра распределения и др.) при испытаниях на коррозионную усталость валов и их соединений, моделирующих режимы работы средств механизаций в условиях атмосферных воздействий, показали, что при большой долговечности ($N > 10^7$ циклов) длительные пределы выносливости можно повысить на 110...125 %, а срок службы – в 1,8–3,6 раза [5].

1. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З. Надежность машин – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.

2. Проников А. С. Параметрическая надежность машин – М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 2003. – 536 с.

3. Степнов М. Н., Шаврин А. В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.

4. Детали машин и основы конструирования: учебник / М. Н. Ерохин[и др.]; под ред. М.Н. Ерохина. – М.: КолосС, 2005. – 462 с.

5. Стакян М. Г., Миракян Г. Г., Маргарян Э. А. Математическое моделирование

процесса коррозионного усталостного разрушения // Вестник Инженерной академии Армении (ВИАА). – 2010. – № 2. – Т. 7. – С. 194–200.

Материал поступил в редакцию 15.05.12.

Чибухчян Сурен Смеилович, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Наземные транспортные системы»

Тел. 8-374-93-22-35-04

Стакян Мигран Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Механика»

Тел. 8 (374) 52-03-48

Попов Валентин Валентинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Тракторы и автомобили»

Тел. 8 (499) 976-07-44

УДК 502/504 : 631.3.004.67-631.145

Г. И. БОНДАРЕВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина»

В. Н. ОРЛОВ

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

ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕМА ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

При обосновании объема необходимой информации и проведении наблюдений для изучения случайных величин предложена процедура определения минимального числа объектов наблюдений, при которой вначале устанавливаются оценки среднеарифметической величины изучаемого показателя и его дисперсия, а затем подсчитывается коэффициент вариации.

Информация, дисперсия, коэффициент вариации, наблюдения, наработка.

When substantiating a volume of the necessary information and carrying out observations for studying random varieties there is proposed a determination procedure of the minimal number of observation objects under which at first arithmetic mean value estimates of the indicator under study and its dispersion are established and then the coefficient of dispersion is calculated.

Information, dispersion, coefficient of variation, observations, volume of information and operating time.

При проведении экспериментальных исследований возникает необходимость выбора теоретического закона распределения случайной величины, найденной

опытным путем. Для определения величин параметров технического состояния элементов машин и оборудования с достаточной точностью перед проведением