

шин как систем с зависимым поведением элементов в рамках ресурсной механики машин.

Литература. 1. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. — 448с. 2. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с. 3. Велигурский Г.А. Аппаратурно-программные методы анализа надежности структурно-сложных систем. — Мн.: Наука и техника, 1986. — 256 с. 4. РТМ 70.0001.246-84. Критерии предельного состояния тракторов и их составных частей. — М., 1985. 5. Альгин В. Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин. — Минск: Навука і тэхніка, 1995. — 256 с. 6. Альгин В.Б. Методология ресурсно-функционального вероятностного расчета, проектирования и оценки мобильной техники // Механика машин на пороге III тысячелетия. Материалы междунар. науч. конф., Минск, 23—24 нояб. 2000 г.— Мн.: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2001. — С. 292—306.

УДК 621.833

Благодарный В.М.

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*Технологический университет г. Кошице
Прешов, Словакия*

Любой элемент механической системы обладает субстанцией, характеризующей основные свойства, обеспечивающие его работоспособность.

Работоспособное состояние элемента определяется как состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической или конструкторской документации. Таким образом, работоспособность можно охарактеризовать совокупностью признаков, изменяющихся в определенных пределах. Выход какого-либо признака за пределы допуска приводит к отказу элемента. Признаки, позволяющие оценить работоспособное состояние элемента, называются критериями работоспособности. Согласно [1] «критерий – это стандарт, с помощью которого производится оценка целей данного уровня». Критерий должен отвечать следующим основным условиям.

Он должен быть представительным, то есть отражать основную, а не второстепенную информацию об элементе.

Критерий должен быть критичным к варьируемым параметрам, то есть достаточно сильно изменяться при изменении параметров, зависящих от принятого решения [1].

Желательно, чтобы критерий был единственным, тогда возможно строгое математическое решение задачи. Однако, в большинстве случаев оказывается, что критериев может быть много. В этом случае существует несколько подходов к решению задачи. Первый из них состоит в сведении ряда критериев к одному

$$\theta_{\Sigma} = \alpha_1\theta_1 + \alpha_2\theta_2 + \alpha_3\theta_3, \quad (1)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — коэффициенты важности (весовые коэффициенты) частных критериев.

Недостаток этого подхода состоит в трудности определения весовых коэффициентов критериев.

Второй подход состоит в превращении части критериев в ограничения. В тех случаях, когда удастся обосновать ограничения по дополнительным критериям, такой подход вполне оправдан.

Третий подход состоит в ранжировании критериев, то есть расположении их в порядке важности.

Критерий должен правильно учитывать неполноту информации, которая может быть стохастической, но при известных характеристиках рассеивания параметров, полной неопределенности относительно ряда параметров и, наконец, вредных факторов, ухудшающих состояние системы. В последнем случае для определения критерия используются методы теории статистических решений и теории игр.

При неизвестных величинах весовых коэффициентов все частные критерии считаются равновероятными, и обобщенный критерий определяется как критерий Лапласа

$$\theta_{Li} = \sum \theta_{ij}. \quad (2)$$

Критерий Лапласа применим, когда о субстанции элемента ничего неизвестно. Если же известны законы распределения частных критериев (зависящих от определенных параметров элемента), то обобщенный критерий определяется по следующей формуле

$$\bar{\theta}_i = \sum_j \theta_{ij} P_j. \quad (3)$$

Если частный критерий имеет максимальное и минимальное значения, то в этом случае для его определения используется формула Гурвица [1]

$$\theta_{ri} = \mu \theta_{ijmax} + (1 - \mu) \theta_{ijmin}. \quad (4)$$

где θ_{ijmax} , θ_{ijmin} — максимальное и минимальное значения частного критерия;
 μ — коэффициент, выбираемый из специфики задачи.

При $\mu = 1$ оценка производится по наиболее выгодным результатам (оптимистическая оценка); выбор производится по $\max[\max \theta_{ij}]$. При $\mu = 0$ оценка производится по наиболее пессимистическим данным. Этот критерий называется критерием Вальда. Он соответствует самой осторожной оценке

$$\theta_{vi} = \theta_{ijmin}. \quad (5)$$

Здесь фактически выбирается $\max[\min \theta_{ij}]$, это основной критерий теории игр. Применение его целесообразно при наличии противодействующих (вредных) факторов.

Критерий Сэвиджа представляет собой разницу между действительным значением и наиболее благоприятным

$$\theta_{ci} = |\theta_{ij} - \theta_{ijmax}|. \quad (6)$$

Здесь оптимальное решение находится из условия минимума разности, то есть

$$\min \theta_{ci} = \min |\theta_{ij} - \theta_{ijmax}|. \quad (7)$$

Критерий Лапласа для обобщенного критерия и критерии Гурвица, Вальда, Сэвиджа для частных критериев могут применяться в случае сравнения однотипных элементов, когда имеется полная неопределенность об их субстанции. Если сравнение производится для разнородных элементов, то в этом случае обязательно необходимо вводить в формулу обобщенного критерия весовые коэффициенты при частичных критериях, то есть

$$\theta_{\Sigma} = \alpha_1 \theta_1 + \alpha_2 \theta_2 + \dots + \alpha_n \theta_n,$$

где $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ — весовые коэффициенты частных критериев.

Определение весовых коэффициентов производится следующими методами: статистическими, множественной корреляции, линеаризации функций случайных величин, статистических испытаний, экспертных оценок [2].

Все методы определения весовых коэффициентов предполагают наличие достаточного объема информации о законах распределения и пределах изменения числовых значений частных критериев; если такой информации нет, то эти методы не могут быть использованы. На стадии проектирования механических систем, как правило, такая информация отсутствует. Для определения весовых коэффициентов частных критериев работоспособности можно использовать метод экспертных оценок, процедура которого в данном случае будет состоять из нескольких этапов: а — разработка анкетных вопросов; б — выбор экспертов; в — опрос экспертов; г — математическая обработка результатов опроса, то есть собственно определение весовых коэффициентов. В качестве объективного эксперта при определении весовых коэффициентов частных критериев работоспособности элементов механических систем может выступать техническая информация (техническая литература, справочники, статьи в научно-технических журналах, патенты и т.п.). Нужно лишь научиться правильно использовать и обрабатывать эту информацию, а экспертов привлекать для изыскания основных алгоритмов этой обработки [3].

Опыт эксплуатации и расчетов элементов механических систем позволяет в качестве основных критериев работоспособности принять следующие: прочность, износостойкость, жесткость, устойчивость, теплостойкость, виброустойчивость, коррозионную стойкость, точность. Таким образом, работоспособность элемента может быть представлена моделью в виде вектора θ_i , компонентами которого являются критерии работоспособности

$$\bar{\theta}_i = \begin{vmatrix} \theta_i^1 \\ \theta_i^2 \\ \dots \\ \theta_i^n \end{vmatrix} \text{ или } \bar{\theta}_i = \|\theta_i^k\|, \quad (8)$$

где $k=1\dots n$ — номер.

Если расчет функционально значимых элементов, то есть наиболее важных с точки зрения работоспособности механической системы, произведен по одним и тем же критериям работоспособности и известны весовые коэффициенты α_i , то работоспособность каждого из этих элементов может быть выражена следующим образом:

$$\bar{\theta}_1 = \begin{vmatrix} \alpha_1 \theta_1^1 \\ \alpha_2 \theta_1^2 \\ \dots \\ \alpha_n \theta_1^n \end{vmatrix}, \bar{\theta}_2 = \begin{vmatrix} \alpha_1 \theta_2^1 \\ \alpha_2 \theta_2^2 \\ \dots \\ \alpha_n \theta_2^n \end{vmatrix}, \dots, \bar{\theta}_m = \begin{vmatrix} \alpha_1 \theta_m^1 \\ \alpha_2 \theta_m^2 \\ \dots \\ \alpha_n \theta_m^n \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Чтобы определить наиболее слабые элементы, лимитирующие работоспособность механической системы [4], необходимо функционально значимые элементы сравнить между собой по работоспособности. Для этого назначается так называемый «стандарт», то есть элемент с нормированными значениями критериев работоспособности. За «стандарт» принимается элемент, у которого критерии работоспособности имеют средние значения

$$|\bar{\theta}| = \begin{vmatrix} \bar{\theta}^1 \\ \bar{\theta}^2 \\ \dots \\ \bar{\theta}^n \end{vmatrix}, \quad (10)$$

$$\bar{\theta}^1 = \frac{\sum \alpha_1 \theta_i^1}{m}, \quad \bar{\theta}^2 = \frac{\sum \alpha_2 \theta_i^2}{m}, \dots, \quad \bar{\theta}^n = \frac{\sum \alpha_n \theta_i^n}{m}.$$

Если значения критериев работоспособности у рассматриваемого элемента будут меньше, чем у «стандарта», то такой элемент можно отнести к слабым. Следовательно, слабый элемент из числа функционально значимых определится по следующему условию

$$\forall |\theta^i| \left\{ \max(|\bar{\theta}| - |\theta^i|) < 0 \right\} \Leftrightarrow |\theta^i| \in C, \quad (11)$$

где C — множество слабых элементов механической системы.

При отсутствии возможности рассчитать работоспособность функционально значимых элементов по критериям работоспособности, оценка работоспособности производится по абсолютным и косвенным информативным параметрам.

Критерий работоспособности может быть выражен как функция многих переменных, в качестве которых выступают параметры P_i^j кинематических пар и звеньев, составляющих элемент механической системы

$$\theta_i^j = f_i^j(P_1^j, P_2^j, \dots, P_k^j). \quad (12)$$

Так, например, большое влияние на износостойкость и прочность детали или кинематической пары оказывают такие параметры, как удельные и контактные нагрузки и давления, их распределение по поверхностям контакта, напряжения, разность твердости сопряженных поверхностей, качество поверхностей, коэффициенты трения, относительные скорости скольжения, геометрические соотношения отдельных частей деталей, точность изготовления, виды режимов работы и т.п. Можно насчитать более 50 различных факторов [5]. В этом случае возможно сравнивать звенья и кинематические пары элементов системы не по критериям износостойкости и усталости непосредственно, а по параметрам, от которых они зависят. Параметры, которые однозначно определяют состояние элемента по рассматриваемому критерию работоспособности, назовем информативными. Так, например, если критерий — прочность, может оцениваться коэффициентом запаса прочности

$$n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \geq [n], \quad (13)$$

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma}{\varepsilon_m + \varepsilon_n} \sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_m},$$

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_\tau}{\varepsilon_m \varepsilon_n} \tau_a + \Psi_\tau \tau_m}, \quad (14)$$

то информативными параметрами будут:

- σ_{-1}, τ_{-1} — пределы выносливости материалов по нормальным и касательным напряжениям;
- σ_a, τ_a — амплитудные нормальные и касательные напряжения;
- σ_m, σ_τ — средние напряжения;
- K_σ, K_τ — эффективные коэффициенты концентрации напряжений;
- $\varepsilon_m, \varepsilon_n$ — масштабный коэффициент и коэффициент качества поверхности;
- Ψ_σ, Ψ_τ — коэффициенты влияния асимметрии цикла напряжений.

Информативные параметры делятся на абсолютные и косвенные. Абсолютными информативными параметрами являются такие, которые непосредственно входят в функциональные зависимости, определяющие соответствующий критерий работоспособности.

Так, например, параметры σ_{-1} , τ_{-1} , σ_a , τ_a , σ_m , σ_r , K_σ , K_τ , ϵ_m , ϵ_n , Ψ_σ , Ψ_τ , входящие в зависимости (14), определяющие критерий работоспособности: прочность — являются абсолютными информативными параметрами.

Не всегда все параметры, входящие в зависимости для определения числовых значений критериев работоспособности, известны, вследствие этого не удастся провести расчет по заданному или выбранному критерию работоспособности.

Если хоть один из параметров, входящих в формулы (14), например, σ_{-1} или τ_{-1} , отсутствует, то рассчитать коэффициент запаса прочности n нельзя. В то же время могут быть известны данные, которые в какой-то мере характеризуют свойства деталей по заданному критерию. Так, в нашем случае могут быть известны, например, характеристики выносливости материала деталей не при симметричном знакопеременном цикле напряжений, а при каком-то асимметричном цикле напряжений или же известны совсем иные характеристики, которые не позволяют напрямую получить абсолютные значения σ_{-1} и τ_{-1} , но в определенной мере могут характеризовать напряженность деталей, например, изменение режима работы детали, то есть изменение нагрузки, частоты функционирования и т.п. В этом случае оценку работоспособности элемента по заданному критерию сделать не удастся, однако сравнение элементов между собой можно произвести, но не по критериям работоспособности, а по параметрам, от которых зависит работоспособное состояние элементов, при этом можно привлечь к анализу также и такие параметры, которые не входят в функциональные зависимости критериев работоспособности, но являются параметрами, характеризующими в какой-либо степени работоспособное состояние элементов. Такие параметры называются косвенными информативными параметрами.

Так, например, косвенный параметр: твердость — не входит в формулы (14) коэффициентов запаса прочности, но абсолютные параметры σ_{-1} , τ_{-1} , K_σ , K_τ , ϵ_n зависят от твердости материала, и в зависимости от твердости работоспособность детали может изменяться в широких пределах.

При анализе работоспособности кинематических пар и звеньев элементов по информативным параметрам следует их проверять по критериям достаточности, существенности и некоррелированности.

Требование существенности системы параметров заключается в том, что среди параметров P_j нет ни одного, который был бы одинаковым по величине для всех сравниваемых элементов

$$P_{ij} \neq \text{Const}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

Если же найдется $P_{ij} \neq \text{Const}$, то он должен быть исключен из системы параметров.

Требование достаточности системы параметров заключается в том, что среди всех рассматриваемых элементов нет элементов с совершенно одинаковыми параметрами

$$P_{ij} \neq P_{ik}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

Требование некоррелированности системы параметров заключается в том, что среди параметров P_i нет ни одной пары, численные значения которых были бы функционально связаны. Если имеется функциональная связь между параметрами P_i и P_n , то один из них исключается.

Таким образом, сравнение элементов между собой производится на основании анализа группы параметров для L кинематических пар и M звеньев, на которые расчленены эти элементы. Допускаемые величины этих параметров обычно зависят от режима работы сопряжений и деталей, поэтому кинематические пары и звенья, на которые расчленены элементы, следует разделить на три группы по виду режима работы:

- группа одноразового действия, то есть таких, время работы которых мало и несоизмеримо со временем работы системы;
- группа длительного действия при постоянной нагрузке, то есть такие, число включений которых и продолжительность функционирования соизмеримы с соответствующими показателями системы;
- группа длительного действия при переменной нагрузке, то есть такие, число включений которых больше числа включений системы, а продолжительность функционирования — соизмеримы.

В случае, когда кинематическая пара или звено могут быть отнесены к каким-либо двум группам (например, зубчатое колесо: его зубья работают длительно с переменной нагрузкой, а ступица — длительно с постоянной нагрузкой), то его следует включать в группу с более жесткими условиями работы (с более жестким режимом).

Кинематические пары и звенья одноразового действия в дальнейшем рассматривать с точки зрения влияния на работоспособность системы из-за усталости и износа не имеет смысла.

Для всех параметров по каждой кинематической паре и звену определяются коэффициенты близости исходя из следующих условий: если увеличение действительного значения параметра по сравнению с нормированным значением данного приводит к снижению работоспособности рассматриваемой кинематической пары или звена, то коэффициент близости рассчитывается по следующей формуле

$$P_{ij} < \bar{P}_{nj} \Rightarrow Y_{ij} = 1 - \left| \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta P_{nj}} \right| \quad (17)$$

Если увеличение действительного значения параметра по сравнению с нормированным значением данного приводит к повышению работоспособности, то коэффициент близости рассчитывается по следующей формуле

$$P_{ij} > \bar{P}_{nj} \Rightarrow Y_{ij} = 1 - \left| \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta P_{nj}} \right|, \quad (18)$$

где i — порядковый номер кинематической пары или звена, $i = 1, L$;

j — порядковый номер параметра, $j = 1, n$;

P_{nj} — нормированное значение j -го параметра, рекомендуемое практикой или же при отсутствии таких рекомендаций определяемое как среднее арифметическое

$$\bar{P}_{nj} = \frac{1}{n} \sum_1^n P_{nj}, \quad (19)$$

$\Delta P_{ij} = |P_{nj} - P_{ij}|$ — модуль разности между нормированным значением и конкретным значением j -го параметра для i -й кинематической пары элемента;

$\Delta P_{nj} = \text{ext}/P_{nj} - P_{ij}/P_{nj}$, $P_{ij} \in D$ — экстремальное значение модуля разности между нормативным максимальным или минимальным значением j -го параметра для i -й кинематической пары, или звена элемента, при этом минимальное и максимальное значения измерены для одного параметра и взяты из множества измеренных значений D .

Можно записать далее, что

$$\text{ext}/P_{nj} - P_{ij}/P_{nj} = \sup/P_{nj} - P_{ij}/P_{nj} \vee \inf/P_{nj} - P_{ij}/P_{nj},$$

$$\begin{aligned} \sup/P_{nj} - P_{ij}/ &= /P_{nj} - P_{ij} \min/, \\ \inf/P_{nj} - P_{ij}/ &= /P_{nj} - P_{ij} \max/. \end{aligned} \quad (20)$$

Если имеются статистические данные по рассматриваемому параметру, то есть ряд случайных числовых значений параметра, то можно показать, что в этом случае коэффициент близости, выраженный в процентах, есть не что иное, как коэффициент вариации [6].

Коэффициент близости Y_{ij} к нормированному значению изменяется в пределах $0 < Y_{ij} \leq 1$. Сумма коэффициентов близости по всем параметрам $\sum Y_{ij}$ является характеристикой кинематических пар и звеньев, позволяющей сравнивать последние между собой

$$x_i = \sum_j Y_{ij}. \quad (21)$$

Таким образом, алгоритм сравнения элементов между собой следующий:

элементы расчленяются до уровня кинематических пар и звеньев;

для каждой кинематической пары и звена определяются коэффициенты близости к нормированному значению по информативным параметрам, и находится их сумма $\sum Y_{ij}$, которая является характеристикой пары или звена;

составляется характеристика элемента, включающая сумму характеристик кинематических пар и звеньев, которые входят в элемент с учетом весовых коэффициентов;

строится ряд приоритетности по значениям характеристик элементов, на первом месте стоит элемент с наименьшей характеристикой.

Если элемент состоит из однотипных звеньев, подлежащих сравнению, влияние информативных параметров на сумму коэффициентов близости идентично и зависит лишь от конструктивных различий звеньев. В случае, если элемент состоит из разнородных звеньев, влияние каждого параметра в сумме коэффициентов близости должно учитываться соответствующим весовым коэффициентом, который определяется методом экспертных оценок или путем эксперимента.

Необходимо отметить, что алгоритм сравнения аналогичен и при расчете по другим критериям (точность, жесткость и т.п.), отличие лишь в параметрах, по которым определяются коэффициенты близости.

При определении слабых элементов использовать информацию о работоспособности если не самих элементов, то их аналогов. По наличию сведений об элементах механической системы их можно разбить на три группы:

1 группа: элементы, имеющие аналоги в других, ранее разработанных и эксплуатируемых системах, то есть по данным элементам есть полная информация о работоспособности;

2 группа: элементы, имеющие аналоги в других, ранее разработанных и эксплуатируемых системах, отличающихся по конструктивному исполнению и условиям эксплуатации, но позволяющие получить ориентировочные оценки показателей работоспособности данных элементов;

3 группа: элементы, разрабатываемые впервые и являющиеся оригинальными. Наименьшую информацию по работоспособности имеют элементы 3 группы.

Элемент, занимающий первое место в ряду приоритетности, должен в первую очередь быть подвергнут тщательному анализу, расчетам и, если надо, испытаниям показателей его работоспособности. Если этот элемент, имеющий наименьшую характеристику работоспособности, удовлетворяет требованиям надежности, то остальные элементы, имеющие большие значения характеристик работоспособности, можно не испытывать.

Литература. 1. Системный анализ и структура управления: книга восьмая // Сб. под общ. ред. проф. В.Г. Шорина, М.: Знание, 1975, - 304 с. 2. Чумаков Н.М., Серебряный Е.И. Оценка эффективности сложных технических устройств. - М.: Советское радио. 1980. - 192 с. 3. Гмошинский Г.И. Инженерное прогнозирование. - М.: Энергоиздат. 1982. - 208 с. 4. Благодарный В.М. Прогнозирование слабого элемента при оценке работоспособности механизма на этапе проектирования // Авиационная промышленность. - 1979. - №9. - с. 21-24. 5. Кралельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение. 1968. - 480 с. 6. Смирнов Н.В., Дунин-Борковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. - М.: Наука. 1969. - 512 с.

УДК 620.171.311.3

В.М.Сурин

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УДАРНУЮ И ВИБРАЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Минск, Беларусь*

Элементы приборов и аппаратуры при транспортировании или эксплуатации на подвижных объектах воспринимают различные механические нагрузки, имеющие сложный характер. Их сводят к вибрационным и ударным воздействиям.

Действующими стандартами предусмотрены следующие методы стендовых испытаний аппаратуры на вибрационную и ударную прочность: испытания на действия синусоидальной и случайной вибраций, многократных ударов.

Разнообразие методов испытаний является результатом поиска компромиссного решения, которое удовлетворяло бы хорошей имитации реальных механических воздействий и наиболее простой их реализации.

Первому условию достаточно полно отвечают испытания на действие широкополосной случайной вибрации и многократных ударов. Испытания на действие синусоидальной вибрации отличаются простотой технических процедур и доступностью оборудования.

Испытания элементов на вибрационную и ударную прочность вызывают сходные эффекты: реакция элементов на вышеуказанные виды воздействия близка к синусоидальному колебанию, основным видом отказа является многоцикловое усталостное разрушение.

При расчетах долговечности элементов, подверженных вышеуказанными видами нагружения, применяют вероятностные методы, основанные на использовании статистических распределений. Случайное поведение показателей долговечности обусловлено стохастической природой процесса усталостного разрушения, неоднородностью структуры и характеристик механических свойств материала, отклонениями размеров и формы элементов от номинальных, различием качества поверхностного слоя и другими подобными явлениями. Необходимо выбрать гипотетическое распределение отказов (долговечности), адекватное истинному распределению, что позволит с большей точностью рассчитывать показатели долговечности при заданной вероятности отказа.

В качестве объектов испытаний выбраны широко используемые в аппаратуре