УДК 629.113: 625.08. 004

И. Ф. Дьяков, д-р техн. наук, проф.
ГОУ ВПО «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Ульяновск, Россия

ОПТИМАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Показан вероятностный метод оценки безотказной работы транспортных машин, который выражен отношением удельных затрат к годовой производительности. Наработка вероятности безотказной работы машин учитывалась в кВт·ч. Данная единица измерения имеет корреляционную связь с отказами на 37 % выше, чем с мото-часами или километрами пробега. Частость отказов представлена в виде случайной функции, для решения которой можно использовать цепи Маркова.

При расчетах безотказной работы транспортных машин до сих пор предполагалось, что прочностные характеристики материалов, а также характеристики случайных процессов нагружения деталей являются детерминированными. Однако в действительности все они обладают различным рассеянием, т. е. являются случайными величинами со своими статистическими характеристиками.

При движении колесных машин в любых условиях коэффициент сопротивления движению непрерывно изменяется, так как постоянно изменяется его составляющие: коэффициент сопротивления качению вследствие неоднородности опорной поверхности и макропрофиль пути. Следовательно, сам коэффициент является случайной величиной и подчиняется нормальному закону распределения. При вероятностной оценке микропрофиля используют различные характеристики, как функция и плотность распределения высот и длин неровностей, которые являются характеристиками случайных величин [1].

Для определения вероятности безотказной работы транспортных машин используют интенсивность отказов. Вероятностная оценка безотказной работы машины включает комплекс эксплуатационных свойств, входящих в математическую модель в виде элементов мультиграфа. Значения этих свойств определяют состояние режима эксплуатации машины за определенный период наработки. Если процесс перехода является случайной величиной (частость отказов), представляемой в виде дискретного состояния непрерывно во времени, то его описывают цепью Маркова. Результаты решения цепи Маркова дают возможность провести исследования по обобщенным моделям транспортных средств, что позволяет оценить колесную машину по конструктивным, технологическим, дорожным, экологическим и эргономическим свойствам. Известны два подхода к построению дискретной модели случайной функции:

1) физический, когда соотношения между входными и выходными показателями определяют из анализа технологических процессов в эксплуатационном режиме и при построении физической модели;

2) статистический, когда можно сочетать физические и экспериментально-статистические методы построения модели.

Случайные значения показателей (последовательность отказов, отнесенных к наработке в кВт·ч $x_0, x_1, ..., x_n$) представлены в виде факторов, принимающих различные значения [2]. Зависимости между первоначальными значениями вероятности безотказной работы (начальный период эксплуатации машины) $P_0(t)$ и соответствующими переходными значениями вероятности рассматриваются в пределах области S (гарантийной наработки до и после проведения ремонта). В результате поиска можно найти такие показатели (параметры), которые обеспечивают $\max\{P_i(t+\Delta t) - P_i(t) \le \varepsilon$. Это достигается многошаговой итерационной процедурой. Далее можно подсчитать вероятность перехода из исправного состояния к отказам, т.е. $x_i \to x_j$. Поток перехода из одного состояния машины в другое выражен через его интенсивность отказов $\lambda_{ij}(t)$; интенсивность восстановления работоспособности машины обозначена $-\mu_i(t)$. В рассматриваемой задаче потоки событий отказов в период эксплуатации являются пуассоновскими. Тогда критерий безотказной работы машины при анализе случайных эксплуатационных показателей, входящих в целевую функцию, представляющую отношение функции удельных затрат $З_i$ на техническое обслуживание и текущий ремонт машины к производительности W, можно представить в виде

$$f(w) = \sum C_i / W \to \min,$$

изменяющийся в течение года дискретно.

При этом важную роль играют вероятности состояний $P_{ij}(t)$ в установившемся режиме работы машины. Вероятности $P_{ij}(t)$ на k-м шаге считаем непереходными, если система задержится (останется) в исправном состоянии x_i, то переходные вероятности $P_{ij}(k)$, входящие в условия ограничения, представим в виде квадратной матрицы. По главной диагонали матрицы (1) стоят вероятности задержки системы в состоянии $x_j\,(j = 1,...,n)$ на k-м шаге. На каждом шаге вероятность безотказной работы колесной машины может находиться только в одном из состояний и для любой i-й строки матрицы сумма всех стоящих в ней вероятностей равна единице.

При нахождении вероятностей безотказной работы машины марковской цепи на k-м шаге $P_j(k)$ $(\kappa = 1,\ 2,\ \ldots,\ n)$ удобно использовать размеченный граф из состояния системы x_i в состояние x_j.

$$P_{ij}(k)=\begin{vmatrix} P_{11}(t) & P_{12}(k)\ldots & P_{ij}(k) & P_{in}(k) \\ P_{21}(k) & P_{22}(t)\ldots & P_{2j}(k) & P_{2n}(k) \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ P_{i1}(k) & P_{i2}(k)\ldots & P_{ij}(t) & P_{in}(k) \\ P_{n1}(k) & P_{n2}(k)\ldots & P_{nj}(k) & P_{nn}(t) \end{vmatrix} \geq 0{,}9\,. \qquad (1)$$

Например, образец такого размеченного графа значений нагрузочных режимов, можно использовать в виде коэффициентов режима нагружения, а также интенсивности отказов $\left\|\lambda_{i,j}(t)\right\|$. При этом необходимо иметь:

1) матрицу интенсивностей отказов $\|\lambda(t)\|$ или размеченный мультиграф постоянных показателей;

2) начальные условия $P_1(0), P_2(0),\ldots,P_n(0),\sum_{i=1}^{n} P_i(0)=0$.

Все интенсивности отказов $\lambda_{ij}(t)$ записывают в виде матрицы

$$|\lambda(t)|=\begin{vmatrix} 0 & \lambda_{12}(t) & \ldots & \lambda_{1j}(t) & \ldots & \lambda_{1n}(t) \\ \lambda_{21}(t) & 0 & \ldots & \lambda_{2j} & \ldots & \lambda_{2n}(t) \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ \lambda_{i1}(t) & \lambda_{i2}(t) & \ldots & \lambda_{ij}(t) & \ldots & \lambda_{in}(t) \\ \lambda_{n1}(t) & \lambda_{n2} & \ldots & \lambda_{nj}(t) & \ldots & 0 \end{vmatrix} < \left[\lambda(t)\right]. \qquad (2)$$

По главной диагонали матрицы (2) стоят нули, а на пересечении i-й строки и j-го столбца стоит функция $\lambda_{ij}(t)$ – интенсивность пуассоновского потока значений. Чтобы марковский процесс был однородным, нужно все потоки событий, переводящие систему из одного состояния в другое, были стационарными пуассоновскими потоками. Матрицу интенсивностей (2) удобно иллюстрировать с помощью размеченного графа состояний. В задачах, связанных с определением устойчивости решения, следует:

1) задаться шагом итерации, настолько малым, чтобы был практически возможен только переход системы в соседнее состояние, а не в одно из других, и чтобы ни в одном из пуассоновских потоков, действующих на систему, практически не могло появиться более одного события;

2) подсчитать для каждой пары состояний $(x_i,\ x_j)$, между которыми может иметь место переход $x_i \to x_j$, переходную вероятность;

3) составить матрицу этих переходных вероятностей, далее пронумеровать шаги и найти все вероятности.

Каждый типоразмер машин характеризуется множеством признаков нагружения. При такой постановке вопроса можно составить модель оптимизации. В качестве критерия оптимальности режима нагружения транспортной машины используем удельный расход топлива и энергозатраты на выполнение работы по передачам. Отношение этих величин дает возможность выбора оптимального режима нагружения, обеспечивая вероятность безотказной работы в заданном интервале времени:

$$f\left(\sum P\right)_i = \frac{g_e}{Q} J(t)_i \ , \tag{3}$$

где g_e – удельный вес топлива, кг/кВт·ч; $J(t)_i$ – энергозатраты на преодоление сопротивлений движению в процессе работы на i-й передаче, кВт·ч; Q – объем выполненной работы, м^3 или ткм.

В результате решения будет выявлен при данной целевой функции (3) режим нагружения машины без учета условий (системы ограничений). Если решать целевую функцию с учетом ограничений, то следует учитывать ограничения на каждой передаче:

– сила тяги на колесах (крюке) на i-й передаче должна быть больше, чем сила сопротивления движению, $F_T > \sum W$;

– коэффициент сцепления движителя должен быть больше допустимого, $\varphi_{сц} > [\varphi_{сц}]$;

– тяговый коэффициент движителя на i-й передаче может быть больше или равен КПД гусеничного движителя, $\eta_T > [\eta_{гус}]$;

– коэффициент буксования может быть меньше допустимого, $\delta < [\delta]$;

– коэффициент приспособляемости двигателя должен находиться в пределах допустимого, $k_\omega = [k_\omega] = 1{,}4 \ldots 2{,}0$.

Решение данной задачи осуществляется с использованием метода оптимизации. Все ограничения должны быть представлены в математической форме, в правой части их используются нормативные данные, т. е. эти условия выражаются обычно неравенствами, установленными допустимыми областями существования параметров машины.

В рассматриваемом примере решение задачи с применением метода штрафных функций выполняется в следующем порядке.

1. В пределах допуска произвольно выбирают выходные параметры из набора случайных чисел и проверяют ограничения.

2. По значениям параметров тяговых характеристик, удовлетворяющих ограничениям, вычисляют величину целевой функции $f\left(\sum П\right)_i$, которая сохраняется в памяти ЭВМ вместе с соответствующими ей параметрами поиска.

3. Выбирают другие случайные значения параметров тяговой характеристики машины, проверяют ограничения и вычисляют величину целевой

функции. Если новая величина $f\left(\sum \Pi\right)_i$ меньше вычисленной на предыдущем этапе, то она идет в память машины вместе с соответствующими параметрами, а прежние значения сбрасываются. Указанные этапы повторяются до тех пор, пока величина $f\left(\sum \Pi\right)_i$ не станет равной допустимой величине или практически перестанет уменьшаться.

Проверки ограничений при направленном поиске можно совместить с вычислением целевой функции $f\left(\sum \Pi\right)_{\min}$, если искать минимум функции

$$E = f\left(\sum \Pi\right)_{\min} + q\sum_{i=1}^{n} p_i ,$$

где q – постоянный коэффициент; p_i – штрафные функции (штрафы), значения которых резко увеличиваются у границ допускаемой области изменения параметров условий ограничений.

Изменение знака функции p указывает на необходимость уменьшения шага. В общем случае целевая функция может иметь несколько минимумов, отличающихся по абсолютной величине.

Минимизации целевой функции препятствует отклонению величины от границы допускаемой области в обе стороны. Целесообразность использования квадратичной штрафной функции обоснована эффективностью этого алгоритма при решении класса задач нелинейного программирования.

По результатам расчета дается заключение, на какой передаче целесообразно использовать транспортную машину в конкретных условиях эксплуатации, обеспечивая максимальную производительность. Увеличение производительности является комплексной задачей, решение которой во многом зависит от правильности загрузки машины. Например, для землеройной машины повышение производительности обеспечивает снижения удельного расхода топлива на единицу выполненной работы. По результатам расчета можно дать рекомендации по снижению расхода топлива в условиях эксплуатации и о целесообразности усовершенствования конструкции машины в целом или отдельных ее агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование полноприводных колесных машин / под общ. ред. А. А. Полунгяна. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – Т. 1. – 484 с.

2. **Дьяков, И. Ф.** Критерий долговечности деталей машин в условиях циклического нагружения / И. Ф. Дьяков, Р. М. Садриев // Изв. вузов. Машиностроение. – 2007. – № 6. – С. 37–39.