

УДК 621.01

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОПАСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В. В. ГРИБ, доктор технических наук, профессор

*Московский автомобильно-дорожный институт (государственный технический университет), г. Москва, Россия*

В статье рассмотрен общий методологический подход к моделированию изменения технического состояния сложных механических систем в процессе изнашивания. Комплекс протекающих в системе деградиационных процессов рассматривается во взаимосвязи и взаимовлиянии. Суть метода заключается в дискретизации системы в пространстве и времени и исследовании ее состояния через задаваемый достаточно малый отрезок времени (шаг наработки). Решение задачи реализуется с помощью компьютерных технологий. Метод позволяет прогнозировать техническое состояние объекта на любой момент эксплуатации, сокращать количество экспериментальных методов контроля, прогнозировать остаточный ресурс.

**Ключевые слова:** механическая система, техническое состояние, изнашивание, динамика, прочность, диагностика, остаточный ресурс.

**Введение.** Актуальность проблемы прогнозирования изменения технического состояния механических систем во времени обусловлена катастрофическим старением основных фондов во всех без исключения сферах производства и необходимостью обеспечения безопасности многочисленного парка машинного оборудования, отработавшего нормативный ресурс. Это в первую очередь относится к потенциально опасным видам производства и техники: энергетическому оборудованию, оборудованию нефтегазохимических производств, транспорту, грузоподъемному оборудованию [1].

На протяжении жизненного цикла машины ее элементы подвергаются деградиационным процессам, к которым относятся изнашивание деталей и узлов трения, старение и коррозия конструкционных материалов и др. Эти процессы влияют на техническое состояние машины и ее выходные, определяющие служебные свойства, параметры.

Техническое состояние многочисленных видов техники различается в зависимости от их конструкции и функционального назначения, однако общими показателями для большинства машинного оборудования являются: геометрические параметры деталей и сопряжений, кинематические и динамические закономерности движения, напряженно-деформированное и температурное состояние элементов, свой-

ства материалов, изменяющиеся в процессе изнашивания, коррозии и старения под воздействием меняющихся во времени режимов и условий эксплуатации (входных параметров).

Сложность описания поведения механической системы обусловлена динамичностью входных и выходных параметров, изменением ее структуры и свойств во времени, множеством одновременно протекающих и взаимосвязанных процессов: изменением геометрического состояния, кинематических, механических, теплофизических параметров и др., их распределенностью в пространстве и стохастичностью. По этим причинам экспериментальное определение и отслеживание во времени параметров технического состояния механических систем затруднительно, ограничено количеством измеряемых параметров, усложнением конструкции и наличием разнообразных датчиков и сложной измерительной аппаратуры.

Методы моделирования механических систем оказывают существенную помощь в оценке их текущего состояния и остаточного ресурса, сокращая время и средства для проведения этих работ. Эти методы должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- обеспечивать адекватность поведения механической системы и ее модели;
- учитывать множество взаимосвязанных протекающих в системе процессов, т. е. рассматривать поведение механической системы в целом, а не отдельных ее составляющих;
- учитывать различные режимы и условия эксплуатации и изменение их во времени;
- учитывать вероятностный характер параметров технического состояния и их изменения во времени.

**Математическое описание сложного объекта** принято представлять в виде обобщенного вектора в многомерном пространстве параметров

$$X^T = \{X_1, X_2, \dots, X_J\}, \quad (1)$$

где  $J = 1 \dots N$  – множество параметров элементарных процессов, координат точек, совокупностью которых описывается состояние объекта.

Достижение этим вектором границы указанного пространства означает переход системы из работоспособного состояния в неработоспособное, т.е. отказ.

Изменение технического состояния описывается интегральным выражением

$$X = X(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} \lambda(X, q) dt, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – обобщенная скорость изменения технического состояния, зависящая от текущего состояния и режима работы механической системы  $q$ .

Общий прием решения этого уравнения требует обращения к численным методам и заключается в дискретизации системы во времени и пространстве и рассмотрении ряда последовательных состояний системы через задаваемый достаточно малый промежуток времени  $\delta t$  (шаг наработки). Скорость изменения состояния сис-

темы на этом отрезке времени принимается зависящей от свойств системы, режимных параметров и состояния системы в начале отрезка времени.

Соответственно уравнение (2) преобразуется в разностное выражение

$$X(t_{i+1}) = X(t_i) + \Delta X_i = X(t_i) + \lambda(t_i) \cdot \delta t \quad (3)$$

и приводится к операторному виду

$$X(t_{i+1}) = AX(t_i) \quad (4)$$

Оператор  $A$  перехода от  $i$  – го к  $i+1$  – му состоянию не содержит производных по времени, что позволяет рассматривать его как суперпозицию операторов элементарных процессов на отрезке времени  $\delta t$ . В конце каждого отрезка времени определяются скорости элементарных процессов для расчета параметров последующего временного интервала. Накапливаемая в результате линеаризации оператора на малом отрезке времени ошибка преодолевается уменьшением шага и применением метода Рунге-Кутты.

**Разработка операторов элементарных процессов.** Формоизменение деталей при изнашивании может быть представлено в виде векторного поля пространства изнашиваемого материала (поля износа), в каждой точке которого определена векторная величина – скорость изнашивания  $\gamma = d\rho / dt$ , где  $\rho$  – радиус-вектор точки. Вектор  $\gamma$  направлен по нормали к поверхности трения в глубь изнашиваемого материала, а его величина зависит от условий в данной точке (удельной нагрузки, температуры, скорости, режима трения) на поверхности трения и свойств материалов.  $\gamma = J \cdot l / \delta x$ , где  $J$  – интенсивность изнашивания материала (отношение толщины изношенного слоя к пройденному пути трения),  $l$  – путь трения, который проходит точка контакта за время  $\delta x$ . Зависимости  $J$  от определяющих изнашивание факторов находятся экспериментальным путем на лабораторных машинах трения.

Каждая взятая на поверхности трения точка совершает в поле износа движение вдоль векторной линии

$$\rho(t_k) = \rho(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} \gamma \cdot dt \quad (5)$$

Аналогично (3), это уравнение может быть представлено в разностной форме

$$\rho_{i+1} = \rho_i + \gamma(x_i) \delta t \quad (6)$$

Процесс формоизменения описывается движением множества точек, лежащих на поверхности трения. Разработка операторов перехода от  $i$ -го к  $i+1$ -му состоянию в процессе изнашивания рассмотрена в литературе [2].

Изменение динамики и нагруженности механической системы в зависимости от изнашивания трибосопряжений. Задача динамики состоит в определении движения механической системы под действием заданных сил. Наличие зазоров в трибосопряжениях, появляющихся в результате износа, приводит к появлению дополни-

тельных степеней свободы и изменению динамики и нагруженности механической системы. Математически динамика такого механизма описывается системой уравнений Лагранжа с дополнительными неопределенными множителями

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j + \sum_{a=1}^s \lambda_a \frac{\partial f_a}{\partial q_j} \quad (7)$$

где:  $T$  – кинетическая энергия механической системы,  $Q_j$  – обобщенная сила,  $q_j$  – обобщенная координата,  $j = \overline{1, r}$  – число обобщенных координат ( $r = k+s$ ),  $f_a$  – условия связи (ограничения, не позволяющие точкам механической системы занимать произвольное положение в пространстве);  $a = \overline{1, S}$  – число ограничений;  $\lambda_a$  – неопределенные множители Лагранжа.

Численное решение уравнений Лагранжа осуществляется методом последовательного рассмотрения состояния механической системы через малое изменение обобщенной координаты. В результате решения задачи в конечном итоге определяются координаты, скорости и ускорения точек звеньев механизма и усилия в кинематических парах [3].

Движение деталей трибосопряжений с зазорами приводит к ударам и вибрации, что может быть зафиксировано вибродиагностической аппаратурой и анализом спектральных характеристик. И, наоборот, по известным спектральным характеристикам с помощью имитационной модели поведения механической системы может быть определено ее техническое состояние. Такая возможность рассмотрена в работах [4, 5].

Изменение напряженно-деформированного и температурного состояния деталей машины. Изменение динамики и нагруженности элементов конструкции вследствие изнашивания трибосопряжений приводит к изменению температурного и напряженного состояния деталей. На каждом шаге наработки такое изменение учитывается решением указанных задач методом конечных элементов. В свою очередь на последующем шаге наработки вносится корректировка на изменение механических (в том числе износостойких свойств материалов) с учетом изменения температуры. Таким образом, разрешается обратная связь между режимными параметрами и скоростью деградиационных процессов.

**Накопление повреждений и усталостная прочность деталей.** При циклической работе в деталях машины накапливаются повреждения. Расчет на прочность таких деталей проводится на основании усталостной теории, в основе которой лежит гипотеза линейного накопления усталостных повреждений, известные параметры кривой усталости материала и циклически меняющихся напряжений. Для кривых усталости, имеющих горизонтальный участок, число циклов до разрушения принимается обеспечивающим весь срок службы машины, и накопления усталостных повреждений не происходит. При амплитуде напряжений, превышающих предел усталости, взаимосвязь между напряжением и числом циклов до разрушения подчиняется зависимости  $\sigma^m N$ , где  $m$  – показатель кривой усталости. При изнашивании трибо-

сопряжений, увеличении ударных нагрузок и амплитуды напряжений происходит более быстрое накопление усталостных повреждений. При этом доля выработанного ресурса равна  $n_i/N_i$ , где  $n_i$ ,  $N_i$  – соответственно число отработанных циклов, приводящих к разрушению при уровне амплитуды напряжений  $\sigma_i$ . С учетом накопления повреждений на предыдущем шаге наработки кривая усталости материала смещается в соответствии с зависимостью [6]

$$\sigma_{-1,i+1} = \sigma_{-1,i} \left[ 1 - \frac{n_i}{N_i} K \left( \frac{\sigma_{A,i}}{\sigma_{-1,i}} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

где:  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости,  $\sigma_A$  – амплитуда напряжений,  $K$  – коэффициент, учитывающий тип стали,  $i$  – номер шага наработки.

Усталостное разрушение происходит за количество шагов наработки, при котором сумма долей ресурса, выработанных на всех уровнях амплитуды напряжений, достигнет единицы.

Совместное решение задач формоизменения деталей при изнашивании, изменения напряженно-деформированного состояния, динамики механизма с зазорами, позволяет воспроизвести изменение технического состояния механической системы в будущем времени и сделать оценку остаточного ресурса.

**Статистическое моделирование технического состояния и расчет ресурса механических систем.** Процессы изнашивания и изменения технического состояния механической системы являются случайными и зависящими от большого количества случайных факторов. Такие статистически сильно смешанные процессы приводят, как правило, к нормальному закону распределения искомых величин: плотности вероятности параметров технического состояния  $p(x)$  при  $t = \text{const}$  и плотности вероятности ресурса  $p(t)$  при  $x = \text{const}$  [7].

Экспериментальное получение статистических закономерностей – трудоемкая задача, требующая большого количества экспериментов и затраты времени. Компьютерное имитационное моделирование позволяет решить эту задачу расчетным путем. Если известны вероятностные закономерности исходных параметров, характеризующих режим работы, свойства и начальное состояние механической системы, то можно провести серии математических экспериментов над детерминистической моделью изменения технического состояния, каждый из которых соответствует случайному набору исходных параметров (метод Монте-Карло). По результатам таких экспериментов по аналогии с натурными испытаниями находят статистические закономерности искомых параметров. Такие эксперименты позволяют производить расчет вероятности безотказной работы механической системы и ее ресурс. Вероятность безотказной работы определяется как вероятность невыхода параметров технического состояния  $X$  за область допустимых работоспособных состояний  $\Omega$  на отрезке времени  $[t_0, t]$ .

$$P(t) = P\{x(\tau) \in \Omega, \tau \in [t_0, t]\} \quad (9)$$

В качестве основного показателя остаточного ресурса определяется гамма – процентный ресурс, задаваемый двумя численными значениями: наработкой и выраженной в процентах вероятностью того, что в течение этой наработки предельное состояние не будет достигнуто. На рис. 1 схематично показано изменение параметра технического состояния и определение остаточного ресурса при достижении этим параметром предельного значения.

Критерий предельного состояния (совокупность признаков, характеризующих неработоспособное состояние) может быть описан одним параметром (например, предельным зазором, пределом прочности и др.).

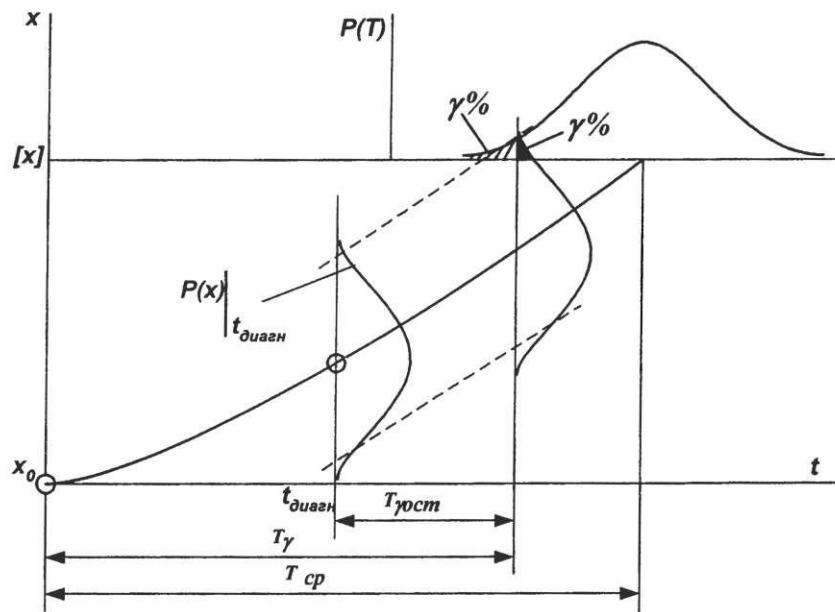


Рисунок 1 - Схема оценки остаточного ресурса по данным технического диагностирования

Наиболее распространенным методом прогнозирования является экстраполяционный метод, при котором рассматриваемый процесс  $x(t)$  представляется в виде детерминированной и случайной составляющих.

$$x(t) = y(t) + z(t) \quad (10)$$

Предполагается, что детерминированная составляющая  $y(t)$  представляет гладкую функцию времени, а случайная составляющая  $z(t)$  – случайный процесс с нулевым математическим ожиданием.

**Заключение.** Рассмотренный метод позволяет проводить оценку технического состояния на многокритериальной основе: по износу трибосопряжений, нагруженности деталей, усталостной прочности, по вибродиагностическим параметрам, с учетом взаимосвязи этих характеристик.

Комплексная модель изменения технического состояния механической системы позволяет оценить состояние системы по косвенным показателям, например, по спектральным характеристикам акустических сигналов.

Методология математического моделирования сложных механических систем включает в себя следующие этапы:

- анализ структуры системы (декомпозиция системы на элементы и протекающие в ней элементарные процессы; установление связей между ними);
- математическое описание элементарных процессов; разработка операторов перехода от одного состояния к последующему;
- разработка алгоритма поведения системы (разработка оператора системы в целом, преобразующего входные параметры в выходные и перехода системы от одного состояния к последующему);
- имитационное моделирование функционирования системы (математический эксперимент над абстрактной моделью).

#### Обозначения

$X$  – вектор технического состояния объекта,  $X_j$  – вектор элементарного параметра,  $t$  – время,  $\delta t$  – шаг наработки,  $i$  – порядковый номер технического состояния,  $A$  – оператор перехода от  $i$  – го к  $i + 1$  – му состоянию,  $\gamma$  – скорость изнашивания,  $\rho$  – радиус-вектор точки на поверхности трения,  $l$  – путь трения, пройденный за время  $\delta t$ ,  $T$  – кинетическая энергия системы,  $Q_j$  – обобщенная сила,  $q$  – обобщенная координата,  $r$  – количество обобщенных координат,  $s$  – число ограничений,  $\lambda_a$  – неопределенный множитель Лагранжа,  $\sigma_{.1}$  – предел выносливости,  $\sigma_A$  – амплитуда напряжений,  $p(X)$  – плотность вероятности параметра технического состояния объекта,  $P(t)$  – вероятность безотказной работы,  $\Omega$  – область работоспособных состояний объекта,  $T_\gamma$  – гамма-процентный ресурс.

#### Литература

1. Гриб В.В. Диагностика технического состояния оборудования нефтегазохимических производств. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2002 – с.268.
2. Гриб В.В. Изнашивание твердых тел. //Трение, износ, смазка (трибология и триботехника). Под ред. А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003.
3. Луканин В.Н., Гриб В.В., Сафонов Б.П., Жуков Р.В. Динамический анализ стержневых механизмов с зазорами. – М.: МАДИ (ГТУ), 2000, 36 с.
4. Гриб В.В., Жуков Р.В. Анализ виброакустических характеристик поршневого компрессора.// Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2001, №1
5. Гриб В.В., Жуков Р.В. Особенности спектральной вибродиагностики поршневых компрессорных машин. // Компрессорная техника и пневматика, 2001, №8, С. 30-32.
6. Гриб В.В., Петрова И.М. Накопление усталостных повреждений и оценка остаточного ресурса деталей с учетом изнашивания трибосопряжений в машине. – М.: Вестник МАДИ (ГТУ), 2005, вып. 4, с.22-24.
7. Гриб В.В. Диагностика технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса магистральных нефтегазопроductопроводов. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2004, 64 с.

**Grib V. Methodological approach to modeling behavior changing and estimation of endurance industrial haggard objects**

This article discusses general methodological approach to modeling behavior changing and estimation of endurance mechanical systems during wear.