

4. Федеральный закон РФ от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ “ Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ ”

Авторы статьи:

Ефременко
Владимир Михайлович
- канд. техн. наук, ст. научн. сотр., зав.
каф. электроснабжения горных и про-
мышленных предприятий КузГТУ
E-mail: chief@kemcity.ru
Тел. 8-902-756-64-74

Савинкина
Олеся Александровна
- ассистент каф. электро-
снабжения горных и промыш-
ленных предприятий КузГТУ
E-mail: olexya@rambler.ru
Тел. 8-950-579-05-50

Наумкин
Роман Борисович
- студент гр. ЭП-052 КузГТУ.
E-mail: r-naumkin@rambler.ru,
Тел. 8-950-263-50-76

УДК 621.879.34

С.Г.Филимонов, В.А.Старовойтов

К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ РЕСУРСОЕМКОСТЬЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ИХ ДЕТАЛЕЙ

Снижение энерго- и ресурсоемкости продукции и услуг одна из важнейших задач стоящих перед промышленностью и научным сообществом России в настоящее время.

За счет использования регулируемых электроприводов можно снизить на 20-50% потребление электроэнергии в механизмах, в которых электрические двигатели рассчитаны на максимальную нагрузку, а средняя их нагрузка составляет 60-80%.

Кроме экономии электроэнергии, с помощью регулируемого электропривода, параллельно, можно решать задачи по снижению или ограничению динамических механических нагрузок в трансмиссии и рабочих органах машин, повышая тем самым их долговечность (или, другими словами, снижать ресурсоемкость продукции, производимой с помощью этих машин). Управление ресурсом следует рассматривать как неотъемлемую часть процесса управления режимом работы машины, снабженной регулируемым электроприводом.

Для оптимального управления ресурсосбережением необходимо оперативно, в реальном масштабе времени, оценивать интенсивность расхода ресурса рабочей машины в зависимости от ее режима работы, задаваемого регулируемым электроприводом. При этом для решения задачи ресурсосбережения не требуется никаких дополнительных технических средств, т.к. для получения информации о механических напряжениях в элементах конструкции машины и управления режимом работы электродвигателя используются штатные датчики тока, напряжения, частоты вращения ротора, входящие в состав комплекта оборудования регулируемого электропривода.

Ресурс – показатель долговечности, характеризующий запас возможной наработки объекта. Долговечность машиностроительных конструкций определяется воздействием таких процессов как изнашивание, усталость, коррозия. По данным

исследований [1-3], если исключить из рассмотрения выходы из строя деталей машин и конструкций вследствие резких нерасчетных перегрузок, природных воздействий, ошибок при эксплуатации или неблагоприятного сочетания этих факторов, все остальные случаи наступления предельных состояний можно отнести либо к накоплению в материале усталостных повреждений, либо к чрезмерному износу трущихся деталей, находящихся в контакте с рабочей или окружающей средой.

Для несущих металлоконструкций, элементов передаточных механизмов приводов, работающих при высоких переменных нагрузках, до 80% случаев достижения предельного состояния вызвано их усталостным повреждением [1]. Усталостное повреждение, являясь результатом воздействия переменных механических нагрузок, в свою очередь, может служить мерой, позволяющей наиболее объективно оценивать режим работы машины, совершенство ее системы управления, уровень квалификации человека-оператора.

Анализ существующих методов технической диагностики [4] позволяет выделить два основных подхода к решению задачи диагностирования усталостного повреждения деталей машин в процессе эксплуатации:

- диагностирование в пространстве параметров, т.е. определение степени усталостного повреждения элемента конструкции по изменению физико-механических свойств материала деталей;

- диагностирование косвенными методами с помощью моделей процесса усталостного повреждения материала конструкции.

Отличительной особенностью косвенного метода диагностирования усталости от широко применяемых в технической диагностике методов с использованием физических моделей проверяемых объектов, является то, что выходные сигналы объекта (накопленное усталостное повреждение), отсутствует. Поэтому близость состояния объекта

и модели может быть определена только после прекращения функционирования объекта вследствие его разрушения или замены и оценки его состояния методами дефекто- и структуроскопии.

Другую группу технических средств, позволяющих косвенным методом измерить усталостное повреждение, составляют устройства, в основу работы которых положена математическая модель процесса усталостного разрушения [1].

Можно предположить, что существует положительная, возрастающая во времени функция $\xi(t)$, называемая *усталостным повреждением*, изменение которой во времени описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{\xi}(t) = f(\xi, \bar{S}, \bar{q}), \quad (1)$$

где $\bar{S}(t)$ - вектор внешних воздействий, характеризующий нагрузку; $\bar{q}(t)$ - вектор параметров, характеризующий усталостную прочность детали.

Согласно уравнению (1), скорость накопления усталостных повреждений от нагрузки на деталь (вектор \bar{S}), свойств материала (вектор \bar{q}), истории нагружения (скаляр ξ).

При определении усталостного повреждения деталей в условиях эксплуатации необходимо учитывать, что вектор внешних воздействий \bar{S} доступен для измерения, а вектор \bar{q} , характеризующий усталостную прочность детали (его параметры определяются априорно по образцам деталей, которые разрушаются в процессе испытаний) задается стохастически. Следовательно, усталостное повреждение детали $\xi(t)$, измеренное этим методом, также является величиной случайной с условным распределением плотности вероятностей $\rho(\xi/q)$. Сравнительная оценка влияния эксплуатационных нагрузочных факторов (влияние вектора \bar{S}) на рассеяние долговечности и прочностных свойств $\rho(\xi/q)$ сделанная в работе [4] применительно к достаточно сложным элементам конструкции - стальным канатам, показывает, что с достоверностью 0,95 эксплуатационные условия оказывают в 2,7-3,5 раза большее влияние на долговечность, чем неоднородность прочностных свойств материала конструкций (влияние вектора \bar{q}).

Математическую модель процесса усталостного повреждения в элементе конструкции представим в виде алгоритма, при реализации которого последовательно осуществляются:

- схематизация действующих на элемент механических напряжений (формирование вектора \bar{S});
- преобразование вектора \bar{S} с помощью пространства параметров \bar{q} , характеризующих усталостную прочность детали, в ее усталостное повреждение;

- суммирование усталостных повреждений элементов, полученных за время функционирования машины.

Рассмотрим подробно все три аспекта модели.

Схематизацию случайного процесса изменения рабочей нагрузки детали (определение параметров вектора внешних воздействий $\bar{S}(t)$) можно осуществить двумя различными способами [2], основанными на определении стохастических характеристик процесса, либо на представлении процесса в виде последовательности циклов с известными (т.е. измеряемыми) параметрами: амплитудами, средним значением, размахом и т.д.

Часто в качестве стохастической характеристики процесса нагружения используют среднеквадратическое значение (СКЗ) механического напряжения детали.

Погрешность определения усталостного повреждения при схематизации процесса изменения напряжения с помощью его СКЗ, связана с неполной информацией о сложности структуры процесса, оцениваемой коэффициентом β , представляющим собой отношение числа максимумов к числу положительных пересечений процессом уровня математического ожидания. Для нагрузок машиностроительных конструкций β может изменяться пределах от 1 до 4...10, что при прочих равных условиях приводит к увеличению долговечности [5].

Коэффициент $K_\delta(\beta)$, оценивающий влияние ложности структуры на долговечность, является функцией параметров нагружения и не зависит от материала

$$K_\delta(\beta) = \frac{\int_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} f_{max}(\sigma) \beta(\sigma) d\sigma}{\int_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \varphi_{max}(\sigma) d\sigma} \quad (2)$$

где σ_{max} , σ_{min} – максимальное и минимальное повреждающие напряжения;

f_{max} – функция плотности вероятности максимумов, подчиняется при $\beta \leq 1$ закону Релея; φ_{max} – функция плотности вероятности максимумов, подчиняется при $\beta > 1$ закону Райса.

Дополнительная погрешность, возникающая при вычислении долговечности через СКЗ процесса нагружения, связана с асимметрией последнего. Асимметрия процесса изменения механических напряжений оценивается коэффициентом μ , характеризующимся отношением математического ожидания к СКЗ процесса.

Коэффициент влияния асимметрии на долговечность запишется в виде:

$$K_d(\mu) = [K_s(\mu)]^m = \left(\frac{S\sigma_1}{S\sigma_s} \right)^m, \quad (3)$$

где m – показатель степени кривой усталости при случайному нагружению; $K_s(\mu)$ – коэффициент эквивалентности, характеризующий для равных долговечностей соотношение СКЗ асимметричного и симметричного процессов нагружения.

В статье [5] помещена экспериментальная зависимость коэффициента эквивалентности $K_s(\mu)$ от асимметрии случайногопроцесса нагружения и делается предположение о справедливости полученной зависимости для различных материалов.

Таким образом, погрешность определения усталостной долговечности, вызванную неполнотой информации о процессе нагружения, можно оценить общим коэффициентом влияния нагрузочного фактора

$$K_d(\beta, \mu) = [K_s(\mu)]^m \cdot Kd(\beta), \quad (4)$$

который учитывает влияние асимметрии и структуры процесса нагружения.

При $m=8$, $\mu=0\dots2$, $\beta=1\dots10$ и с учетом приведенных выше зависимостей, коэффициент влияния нагрузочного фактора $K_d(\beta, \mu)$ изменяется в пределах от 0,23 до 14, что делает применение метода неприемлемым.

Более полную и точную информацию о воздействии внешних нагрузок можно получить, используя *методы схематизации*, основанные на дискретизации процесса нагружения детали на циклы с параметрами, значения которых определяются непосредственно в процессе работы машины в реальном масштабе времени.

В качестве параметров, представляющих собой координаты вектора внешних воздействий \bar{S} , принимают, в зависимости от выбранного метода схематизации, среднее значение механического напряжения σ_m , амплитуду его переменной составляющей σ_a , размах, положительные экстремумы напряжений, длительность цикла и т.д. [2].

При применении таких методов схематизации ни нестационарность процесса изменения механических напряжения, ни изменение его спектральной плотности не оказывают влияния на точность измерения. Расширяя размерность пространства внешних воздействий, либо выбирая комбинации наиболее существенных из них и, вводя в него не только параметры процесса изменения механической нагрузки, но и факторы, характеризующие влияние окружающей среды, например, температуры, ионизирующего излучения, коррозии, можно строить математические модели усталостной долговечности, учитывающие специфику работы конкретной конструкции.

Преобразование вектора \bar{S} с помощью пространства параметров \bar{q} в величину усталостного повреждения. Явление усталостного повреждения имеет четкую вероятностную природу. Циклическая долговечность при испытаниях на усталость может изменяться при одной и той же амплитуде напряжений на порядок и даже более [1]. К числу факторов, влияющих на разброс прочностных свойств материала, относятся различного рода дефекты, несовершенство технологии изготовления деталей, неоднородность материала.

В уравнении (1) характеристики прочностных свойств материала был введен вектор прочности \bar{q} . В качестве компонентов вектора \bar{q} , характеризующих сопротивление материала усталости, обычно принимают параметры кривой усталости – предел усталостной прочности σ_R и показатель степени m , являющиеся случайными величинами. Как показывают исследования [6], наибольшим рассеянием обладает предел усталостной прочности материала σ_R .

Для оценки влияния процесса нагружения \bar{S} на расход ресурса усталостной долговечности необходимо представить компоненты вектора прочности \bar{q} не плотностью вероятностей, а их математическими ожиданиями, т.е. использовать детерминированную прочностную модель элемента конструкции, обладающую среднестатистическими для данного класса элементов прочностными свойствами.

Поэтому при построении модели усталостного повреждения будем применять так называемые 50% кривые усталости, характеризующие усталостную прочность деталей (вектор \bar{q}), определяемые при испытании на усталость деталей каждого класса и используемые конструкторами при расчете конструкций на усталостную долговечность.

Другими словами: априорная информация об усталостной прочности материала конструкции представлена в виде n -мерного пространства разрушающих факторов, базисом которого являются параметры вектора внешних воздействий \bar{S} , а каждой точке этого пространства соответствует детерминированная величина усталостного повреждения за один цикл изменения нагрузки.

Суммирование усталостных повреждений элементов. Несмотря на множество разработанных в настоящее время гипотез накопления усталостных повреждений в материале конструкций [1,2], наиболее приемлемой, с точки зрения технической реализации и достоверности для использования в математической модели на наш взгляд является гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений, которую можно записать в виде:

$$\xi = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

где k – число уровней дискретизации механической нагрузки;

N_i – число циклов до разрушения детали при i -ом уровне нагрузки;

n_i – число циклов с i -ым уровнем нагрузки, которые испытала деталь за время функционирования.

Рассмотренная математическая модель процесса усталостного повреждения элементов конструкции может быть представлена в виде алгоритма реализующего следующую последовательность действий:

- измерение и вычисление в реальном масштабе времени параметров вектора внешних воздействий \bar{S} с помощью штатных датчиков регулируемого привода и его микропроцессорного контроллера;

- дискретизация процесса изменения внешних воздействий во времени на циклы (например, по принципу максимумов);

- дискретизация параметров вектора \bar{S} по уровням (эта задача решается автоматически, поскольку параметры вектора в современных цифровых системах управления представлены кодами);

- отображение дискретных значений вектора \bar{S} в величину циклового усталостного повреждения с помощью пространства разрушающих факторов (технически представляющего собой область памяти в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) контроллера, адресными координатами которой являются цифровые коды значений параметров вектора \bar{S});

- суммирование цикловых усталостных повреждений, хранящихся в ПЗУ по адресам, указанным параметрами вектора \bar{S} .

На кафедре электропривода и автоматизации КузГТУ были разработаны и изготовлены на элементной базе с жесткой логикой устройства для определения расхода ресурса усталостной долговечности металлоконструкций, реализующие рассмотренный алгоритм и работающие в реальном масштабе времени [7].

Проведенные промышленные испытания устройств подтвердили работоспособность алгоритмического метода определения расхода ресурса усталостной долговечности деталей машин и механизмов, а современная микропроцессорная элементная база сделала возможной их техническую реализацию чисто программными средствами на базе компонентов цифровой системы управления регулируемого электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
2. Прошковец Й., Войтишек Я. Расчет долговечности элементов машин, нагруженных переменными колебательными силами// Проблемы прочности. – 1980. - №9. – С. 21-29.
3. Повышение прочности и долговечности горных машин./Под ред. Докунина А.В. –М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
4. Иванова В.Г., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов.-М.: Металлургия, 1975.- 456с.
5. Шеффер Л.А., Ежов В.Г., Завалич И.Р. Оценка влияния асимметрии на долговечность при случайном нагружении// Проблемы прочности. – 1980. – №2. – С.24-37.
6. Гусев А.С., Светлицкий В.А. Расчеты конструкций при случайных воздействиях.- М.: Машиностроение, 1984.-240 с.
7. А.с. №1232990 СССР, МКИ G 01N 3/06. Установка для определения усталостной долговечности машиностроительных конструкций/ П.Д.Гаврилов, С.Г.Филимонов (СССР) Заявлено 21.11.84; Опубл. 23.05.86. Бюл.№ 19.

□ Авторы статьи:

Филимонов
Сергей Гаврилович
– канд. техн. наук, доц.
каф.электропривода и автоматизации
КузГТУ, тел.8(384-2)39-63-54

Старовойтов
Владимир Алексеевич
– канд. техн. наук, доц.каф. элек-
тропривода и автоматизации
КузГТУ, тел.8(384-2)39-63-54