

УДК 621.879.34 (088.8); 620.178.311.4 (088.8)

С.Г.Филимонов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ – ОСНОВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОЁМКОСТЬЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для несущих металлоконструкций, деталей передаточных механизмов, работающих при высоких переменных нагрузках, в 50-80% случаев достижение предельного состояния вызвано их усталостным повреждением.

Усталостное повреждение, являясь результатом воздействия механических нагрузок, в свою очередь, может служить мерой, позволяющей наиболее объективно оценивать режим работы машины, совершенство ее системы управления, уровень квалификации оператора, состояние внешней среды (например, качество подготовки забоя, если рассматриваемая машина – экскаватор).

Современные методы защиты конструкций механизмов от преждевременного исчерпания их ресурса основаны на ограничении механических нагрузок в деталях машин. В мощных и, как правило, дорогих механизмах (например, в карьерных экскаваторах) функции ограничения механических нагрузок в электромеханических системах приводов возложены на их системы управления.

Нами была произведена оценка влияния параметров системы управления приводом подъема карьерного экскаватора ЭКГ-4,6 (в частности коэффициента отсечки Котс), отвечающих за ограничение механических нагрузок, в свою очередь, влияющих на интенсивность накопления усталостных повреждения в металлоконструкциях экскаватора и деталях редуктора передаточного механизма.

Анализ современных методов технической диагностики позволяет выделить два основных подхода к решению задачи

идентификации усталостных повреждений элементов конструкций в процессе эксплуатации:

- определение степени усталостного повреждения деталей по изменению физико-механических свойств материала (т.е. методами неразрушающего контроля);

- диагностирование косвенными методами с помощью физических и математических моделей процесса накопления усталостных повреждений в материале конструкции.

Методы неразрушающего контроля, широко используемые в машиностроении, позволяют вести диагностирование усталостных повреждений на инкубационном периоде, фиксировать момент появления усталостных трещин и других дефектов деталей. Но появление усталостных трещин свидетельствует о финальной части процесса усталостного разрушения конструкции. Для целей же автоматического управления процессом функционирования машины в первую очередь важна оперативность получения информации об усталостном повреждении её деталей и узлов на сравнительно малых интервалах времени и стабильность метрологических характеристик вычислительного устройства в течение всего периода эксплуатации машины.

В наибольшей мере поставленной задаче соответствуют методы и устройства, идентифицирующие усталостное разрушение с помощью математической модели этого процесса.

Можно предположить, что существует положительная, возрастающая во времени функция $U(t)$, называемая уст-

лостным повреждением, изменение которой во времени описывается дифференциальным уравнением

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

где $S(t)$ - вектор внешних воздействий, характеризующий внешнюю нагрузку;

$q(t)$ - вектор параметров, характеризующих усталостную прочность детали.

Согласно уравнению (1) скорость накопления усталостных повреждений зависит от характера нагрузки на деталь (вектор S), прочностных свойств материала (вектор q), истории нагружения (скаляр U).

При определении усталостного повреждения деталей в условиях эксплуатации вектор внешний воздействий S доступен для измерения, вектор q , характеризующий усталостную прочность детали, представляет собой априорную информацию, полученную в ходе испытаний деталей и материалов, из которых они изготовлены на усталостную долговечность, и задается стохастически.

Усталостное повреждение детали $U(t)$, измеренное этим методом, также является величиной случайной с условным распределением плотности вероятностей $p(U/q)$.

Сравнительная оценка влияния эксплуатационных нагрузочных факторов (вектор S) на рассеяние долговечности и прочностных свойств (вектор q), сделанная в работе [1], с достоверностью 0,95 показывает, что эксплуатационные условия оказывают в 2,7-3,5 раза больше влияния на долговечность, чем неоднородность прочностных свойств материала конструкций.

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

- схематизация действующих на конструкцию механический напряжений на циклы (параметры которых и составляют координаты вектора S);

- преобразование вектора S с помощью пространства параметров q , характеризующих усталостную прочность детали, в ее циклическое усталостное повреждение;

- суммирование циклических усталостных повреждений детали.

Рассмотрим подробнее все три аспекта модели.

В разработанной нами модели использован детерминированный метод схематизации нагрузки. Сущность метода заключается в том, что нагрузка, которую воспринимает деталь, измеряется датчиками и с помощью вычислительного устройства разбивается на циклы, параметры которых определяются в реальном масштабе времени. В качестве параметров этих циклов, представляющих собой координаты вектора внешних воздействий S , принимались в зависимости от выбранного метода схематизации среднее значение механического напряжения в детали Gm , амплитуда переменной составляющей цикла Ga , длительность цикла Tc [2].

При применении детерминированного метода схематизации ни нестационарность процесса изменения механических напряжений, 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 ок-

ружающей среды на процесс усталостного повреждения детали, например, температуру, ионизирующее излучение, коррозию, можно строить модели усталостного повреждения, учитывающие специфику работы деталей.

При решении задачи оценки влияния параметров вектора нагрузки S на расход ресурса усталостной долговечности представим компоненты вектора усталостной прочности q не плотностью вероятностей, а их математическими ожиданиями, т.е. используем детерминированную прочностную модель детали, обладающую среднестатистическими для данного класса элементов прочностными свойствами.

Нами было разработано устройство [3], реализующее рассмотренный алгоритм и предназначеннное для определения усталостного повреждения элементов привода карьерного экскаватора под воздействием знакопостоянных, нестационарных случайных механических нагрузок.

Случайный процесс изменения механических напряжений в исследуемой конструкции схематизирован по методу максимумов [2], у которого среднее значение Gm и амплитуда переменной составляющей Ga каждого цикла равны соответствующим параметрам реального процесса изменения нагрузки. В качестве гипотезы накопления повреждений принята гипотеза линейного суммирования.

Хранящаяся в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) блока нелинейных преобразований априорная информация об усталостной прочности детали при различных значениях Ga и Gm , используемая обычно в машиностроительных расчетах в виде семейства кривых усталости, преобразована в двухмерное пространство, представляющее собой матрицу, у которой номерам строк соответствуют дискретизированные

с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) уровни амплитуды переменной составляющей Ga , номерам столбцов - уровни среднего значения механических напряжений Gm_j , а элементам на пересечении i -ой строки и j -го столбца - усталостные повреждения за один цикл изменения рабочей нагрузки

$$\Delta U_k = 1/N_{ij}, \quad (2)$$

где N_{ij} – среднестатистическое число циклов до разрушения детали при i -м уровне Ga и j -м уровне Gm , полученное по кривым усталости.

Величина усталостного повреждения детали за один цикл ΔU_k складывается в сумматоре с ранее полученными значениями повреждения, осуществляя тем самым алгоритм линейного суммирования повреждения:

$$U = \sum_{k=1}^N \Delta U_k .$$

Но информацию об интенсивности усталостного повреждения элементов конструкции (или, другими словами, об интенсивности расхода ресурса усталостной долговечности элементов конструкции) мы можем оценить только с помощью какого-либо критерия эффективности.

Под эффективностью функционирования электромеханической системы (ЭМС) мы будем понимать нормированный к затратам результат действия или деятельности системы на определенном интервале времени. Физическим критерием эффективности, пригодным для характеристики практически любой системы, является ее полезная (внутренняя или отдаваемая) энергия. Энергетические показатели физически измеряемы, универсальны и удобны для описания взаимодействия.

Применительно к ЭМС приводов горных машин общим фундаментальным показателем ее результативности может служить совершаемая механическая работа, а в качестве из-

расходованного ресурса – усталостное повреждение ее деталей. Наиболее удобной формой критерия эффективности ЭМС на наш взгляд служит пороговая форма показателя качества [4], определяемая как величина усталостного повреждения элементов привода (израсходованный ресурс) за время t_n , в течение которого ЭМС совершила заданную механическую работу A^0

$$W = U(t_n). \quad (3)$$

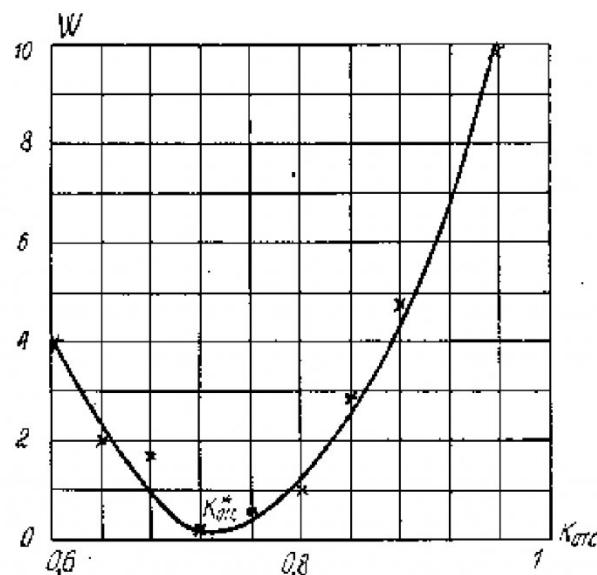
Величина работы A^0 выбиралась равной среднестатистической работе привода подъема за 10 циклов экскавации (5-7 минут непрерывной работы машины).

Особенность принятого критерия – возможность его определения только в дискретные моменты времени t_n , когда становится тождеством выражение

$$A^0 - \int_0^{t_n} P_{\text{дв}}(t) dt = 0 \quad (4)$$

Из (4) следует, что интервал времени t_n , на котором определяется очередное значение показателя эффективности (3) зависит от мощности развивающей приводным двигателем ЭМС $P_{\text{дв}}(t)$ и может быть при перерывах в работе сколько угодно длительным.

Исследования, проведенные на экскаваторе и на математической модели ЭМС привода подъема, показали, что зависи-



Зависимость критерия эффективности W от значения коэффициента отсечки K_{omc} системы управления приводом подъема экскаватора

мость порогового критерия эффективности (3) от коэффициента отсечки статической характеристики привода подъема K_{omc} носит экстремальный характер (рисунок).

При этом установлено, что координата K_{omc} , соответствующая экстремуму критерия эффективности W_{min} , при увеличении дисперсии нагрузки смещается в область меньших значений K_{omc} , и, наоборот, при малой вариации нагрузки экстремум показателя эффективности смещается в область больших значений K_{omc} , увеличивая тем самым производительность машины. Большое влияние на

ресурсоемкость процесса функционирования ЭМС привода подъема оказывало качество подготовки забоя, уровень квалификации и приемы работы машинистов.

Так, в отдельные смены отмечалось резкое в 2,5-3,7 раза повышение удельного расхода ресурса передаточного механизма привода подъема. Изменение значения коэффициента отсечки K_{omc} в процессе работы машины позволило минимизировать ресурсоемкость функционирования ЭМС привода подъема экскаватора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
2. Серенсен С.В. и др. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975, - 488 с.
3. А.с. №1208491 СССР. МКИ G 01 N 3/06. Устройство для определения усталостной долговечности машиностроительных конструкций/ П.Д.Гавrilov, С.Г.Филимонов (СССР). № 3574191/25-28. Опубл. 30.01.86. Бюл. № 4.
4. А.с. №1491972 СССР. МКИ Е 02 F 9/20 . Способ управления электроприводом постоянного тока / П.Д.Гавrilov, С.Г.Филимонов (СССР). № 4321754/29-03. Опубл. 07.07.89. Вып. № 25.

□ Автор статьи:

Филимонов

Сергей Гавrilovich

- канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизации