

**П. И. Михеев** – студент кафедры электротехники и технической диагностики

**Е. В. Сударикова** (канд. техн. наук, доц.) – научный руководитель

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Мехатронные системы (МС) – это класс исполнительных устройств, у которых надежность и качество формирования выходных механических характеристик повышены за счет выполнения ряда функций средствами электроники. Они широко применяются в производственных технологических процессах, бытовой, медицинской, военной и космической технике, связи. Требования, предъявляемые к этим изделиям, очень разнообразны. Одним из важнейших требований, определяющих качество МС, является надежность.

Подтверждение гарантийного ресурса высоконадежных изделий является трудной задачей. В настоящее время она решается экспериментальным путем – путем проведения ускоренных испытаний (УИ) до отказа испытываемых образцов контрольной выборки. При этом испытания проводятся групповыми методами по двум способам: при постоянном значении коэффициента ускорения испытаний или при постоянстве форсирующего фактора для всей выборки [1]. К недостаткам такого пути подтверждения надежности относится большая длительность (и, соответственно, стоимость) испытаний; кроме того, остается неясной динамика реодинамических процессов, приводящих к отказу изделий.

Для сокращения сроков получения информации о надежности изделия УИ необходимо совмещать с ИП ресурса испытываемых образцов. Максимальные точность и достоверность индивидуальной оценки ресурса испытываемого изделия при минимально возможной длительности испытаний позволяет обеспечить метод комплексного проведения УИ и ИП. ИП параметра состояния и ресурса производится по результатам каждого этапа испытания. Дополнение УИ индивидуальным прогнозированием (ИП) технического состояния и ресурса МС позволит сократить время получения информации о надежности каждого испытываемого образца, причем испытания могут завершаться до перехода МС в предельное состояние.

По критерию надежности МС являются изделиями со слабой взаимосвязью между элементами. Наименее надежным элементом, ограничивающим ресурс МС в целом, являются опоры вращения ее электромеханического блока (ЭМБ). Поэтому электронный блок управления МС в данной работе не рассматривается. Наиболее применяемыми опорами являются шариковые подшипники (ШП) на пластичной смазке.

Для проведения УИ и ИП выбор диагностических параметров (ДП) производится на основе анализа взаимосвязи основных процессов в опорах ЭМБ. Необратимые изменения технического состояния опор происходят под действием вибрации и обусловлены многократным повторяющимся деформированием шариков и колец в контактных зонах, а также деградацией смазочного слоя. Поэтому в качестве ДП выбраны: среднеквадратическое значение и спектр виброускорения на корпусе изделия, функция контактирования элементов опор и несущая способность смазочного слоя.

В качестве параметров состояния выбраны спектральные составляющие разложения профилей беговых дорожек колец и средний радиальный зазор в подшипнике. Эти параметры количественно характеризуют усталостный износ элементов ШП.

Прогнозирующие выражения имеют вид [2]

$$\hat{r}_{qj}(\tau) = r_{qj}(0) + I_j A_{qj} \tau = r_{qj}(0) + \beta_0 Q e^{-w(j-2)} A_{qj} \tau;$$

$$\hat{\Delta}(\tau) = \Delta(0) + 3 I_3 A_0 \tau = \Delta(0) + 3 \beta_0 Q \sqrt{\sum_{j=2}^n e^{-w(j-2)}} A_0 \tau,$$

где  $r_{qj}(0)$ ,  $\Delta(0)$  – начальные значения амплитуд гармоник  $r_{qj}$  спектрального представления профилей беговых дорожек по следу качения и среднего радиального зазора в ШП;  $q = 1, 2$  – номер кольца ШП;  $j = 2, \dots, n$  – номер гармоники;  $I_j$ ,  $I_3$  –  $j$ -е спектральные составляющие и эффективное значение ин-

тенсивности изнашивания элементов ШП;  $A_{qj}$  – амплитуды  $j$ -х гармоник разложения динамических нагрузок, действующих на  $q$  –е кольцо;  $\beta_0$ ,  $w$  – индивидуальные коэффициенты адаптации;  $Q$  – эффективное значение динамической нагрузки действующей на ШП.

Индивидуальный характер изменения технического состояния конкретного образца МС учитывается путем корректировки численных значений  $\beta_{0(i)}$ ,  $w_{(i)}$  на каждом этапе УИ. Корректирование коэффициентов адаптации  $\beta_{0(i)}$ ,  $w_{(i)}$  производится на основании ИП ДП на момент окончания  $i$ -х этапов УИ и сравнения их с измеренными значениями. Изменение индивидуальных оценок величин  $\hat{r}_{qj(i)}$ ,  $\hat{\Delta}$  в процессе изнашивания опор является критерием оценки индивидуального ресурса МС.

ИП ресурса МС реализовано на основании метода обратного аналитического прогнозирования, заключающегося в определении момента выхода прогнозируемого процесса за допустимые границы, определяемые предельным состоянием.

Индивидуальный ресурс находится с помощью правила [2]

$$\hat{T}^{np} = \min \left\{ \hat{T}_{r_{qj}}^{np}, \hat{T}_{\Delta}^{np} \right\}, \quad q=1,2; \quad j=\overline{2,n},$$

где

$$\hat{T}_{r_{qj(m)}}^{np} = \frac{r_{qj}^{np} - \hat{r}_{qj(m)}}{I_{j(m)}^H A_{qj(m)}^H} + \sum_{i=1}^m k_{yq(i)} T_{(i)}^{\Phi};$$

$$\hat{T}_{\Delta(m)}^{np} = \frac{\Delta^{np} - \hat{\Delta}(m)}{3 I_{\Delta(m)}^H A_{0(m)}^H} + \sum_{i=1}^m k_{y(i)} T_{(i)}^{\Phi};$$

$k_{yq(i)}$ ,  $k_{y(i)}$  – величины реализованных индивидуальных коэффициентов ускорения, рассчитываемые по ДП, измеренным на начало  $i$ -го этапа УИ;  $r_{qj}^{np}$ ,  $\Delta^{np}$  – параметры предельного состояния.

Достигнутая точность прогноза определяется для  $m \geq 3$  этапов УИ дисперсией предсказания

$$\left\{ \sigma_n^2[\hat{r}_{qj(m)}], \sigma_n^2[\hat{\Delta}(m)], \sigma_n^2[\hat{T}_{r_{qj(m)}}^{np}], \sigma_n^2[\hat{T}_{\Delta(m)}^{np}] \right\} = \sigma_n^2[\hat{\xi}] =$$

$$= \sigma_{\varepsilon}^2[T_n] + \frac{\left( \sum_{i=1}^m [\xi(\tau_i) - \hat{\xi}(\tau_i)] \right)^2 (m T_n^2 - 2 T_n \sum_{i=1}^m \tau_{li} + \sum_{i=1}^m (\tau_{li})^2)}{(m-2) \left( m \sum_{i=1}^m (\tau_{li})^2 - \left( \sum_{i=1}^m \tau_{li} \right)^2 \right)},$$

где  $\sigma_{\varepsilon}^2[T_n]$  – дисперсия ошибки (помехи)  $\varepsilon(\tau)$  на момент предсказания;  $\xi(\tau_i)$  – действительные значения параметров ТС, диагностируемые в моменты времени  $\tau_i$  окончания  $i$ -х этапов УИ по известным методикам, а также действительное значение ресурса.

#### Библиографический список

1. Надежность и эффективность в технике/ Справочник под ред. В. С. Авдеевский и др. М: Машиностроение, 1989. Т.6.: Экспериментальная отработка и испытания / под ред. Р. С. Судакова. 376с.
2. Приборные шариковые подшипники/ Справочник под ред. К. Н. Явленского и др. М.: Машиностроение, 1981. 351 с.