

УДК 62.001.63

ОЦЕНИВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН СТРЕЛОВОГО ТИПА ПО ИЗМЕНЕНИЮ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Козлов В.В., Мокан Д.О., Чирва С.В., Аль-Вароуди У.

*ФГКВООУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,
Санкт-Петербург, e-mail: vka@mil.ru*

В статье представлены результаты исследований по оцениванию работоспособности грузоподъемных машин на основе функционального мониторинга режимных параметров их функционирования. Для оценивания технического состояния объекта исследования предложен показатель работоспособности в виде функции времени и технических параметров машины, измерение которых традиционно подразумевает прекращение эксплуатации, разборку машины и дефектацию ее узлов и деталей. Целью исследования является поиск ресурсосберегающих технологий поддержания требуемого качества агрегатов и систем грузоподъемных машин стрелового типа. Методология исследования основана на имитационном моделировании процесса эксплуатации машины с последующим выявлением связи между ее внутренними техническими параметрами и внешними режимными параметрами функционирования. Выявление таких связей основано на дешифровке осциллограмм внешне доступных параметров с помощью вейвлет-анализа. Результаты работы показали, что для рассмотренной машины информативными внешними параметрами являются давление рабочей жидкости и угловая скорость подъема стрелы. Поэтому оценивание и прогнозирование работоспособности машины можно осуществлять в процессе ее эксплуатации. Таким образом, представлена система функционального мониторинга грузоподъемных машин, обеспечивающая снижение затрат на техническое обслуживание и позволяющая повысить коэффициент готовности.

Ключевые слова: оценивание, техническое состояние, работоспособность, грузоподъемная машина

SERVICEABILITY EVALUATION OF THE BOOM-TYPE CRANE ON THE CHANGE OF THE OPERATING CONDITIONS OF FUNCTIONING

Kozlov V.V., Mokan D.O., Chirva S.V., Al-Varoudi U.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru

The article presents the results of studies on the estimation of the work of the lifting appliances based on the function of monitoring the operating parameters of their functioning. For the evaluation of the technical state of the object of study the quantity of performance as a time function and technical parameters of the machine are proposed, the measurement traditionally involving the decommission, vehicle disassembly and fault detection of its parts and components. The aim of the study is a search of alternative technologies maintaining the required quality of units and systems of boom-type lifting appliances. The research methodology is based on simulating service tests of the operational process with the subsequent identification of the relationship between its technical parameters and external operating parameters of performance. The identification of such relationships is based on the decryption of oscillograph trace of the externally accessible parameters using the wavelet analysis. The results showed that for the machine, mentioned above informative external parameters are the pressure of the working fluid and the angular rate of the boom raise movement. Therefore, estimation and forecasting of the machine performance can be carried out in the course of its operation. Thus, we present the system functional monitoring of the lifting appliances, which provides the cost improvement of the technical support service and availability factor.

Keywords: the evaluation of the work of the boom-type lifting appliances after changing the operating parameters of performance

В настоящее время уровень технического состояния грузоподъемных механизмов формируется при их производстве или ремонте и поддерживается действиями эксплуатирующих организаций. При этом основное содержание ремонта определяется работами по замене систем и агрегатов, выработавших назначенный ресурс.

Как показывает практика, в ходе реализации ремонта заменяются многие элементы, технический ресурс которых не израсходован полностью, т.е. имеет место факт недоиспользования ресурса [7].

Анализ этих особенностей позволил разработать концепцию эксплуатации [6],

при которой применена стратегия, осуществляющая переход от «советской» системы периодического восстановления к индивидуальному оцениванию текущего технического состояния с восстановлением по фактическому состоянию. При этом предполагается выполнение таких ремонтно-профилактических работ, которые обеспечивают работоспособность оборудования, а восстановленный технический ресурс агрегатов и систем соизмерим со сроками назначенных показателей ресурса после проведения капитального ремонта.

Цель исследования заключается в поиске ресурсосберегающих технологий

поддержания требуемого качества агрегатов и систем грузоподъемных машин стрелового типа.

В соответствии с ГОСТ Р 27.002-2009 работоспособность понимается как состояние. В статье предлагается представить работоспособность как способность объекта выполнять возложенные на него функции при различных значениях его технических параметров. Такое свойство используется для описания смены технического состояния объекта. Для этого свойства введем показатель работоспособности $Jo(t)$ (от англ. *job* – работа). Семантика этого свойства позволяет представить концептуальный вид показателя работоспособности как функцию:

$$Jo(\bar{t}) = f \left(\begin{array}{l} \text{параметры термостатики} \\ \text{параметры динамики} \\ \text{параметры нагрузки} \end{array} \right). \quad (1)$$

Выполненный авторами для этого показателя, морфологический анализ позволил выявить определяющие технические параметры в (1). Далее был проведен анализ размерности, основанный на π -теореме, который позволил представить выражение для этого показателя

$$Jo(\bar{t}) = \exp \left(-\text{const} \cdot \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n, \frac{t}{R} \right) = \quad (2)$$

$$= \exp(-\text{const} \cdot \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n, \bar{t}),$$

где π_i – комбинации относительных значений, определяющие технические параметры p_i , имеющие нулевую размерность; R – назначенный срок службы.

При определении неизвестной константы в соотношении (2) используется номинальное значение определяющих параметров $[p_i]$ и величина производственного допуска на i -ый параметр $\Delta p_i^{\text{производ}}$. При таком подходе, для времени начала эксплуатации $t = t_0$ перепишем (2) в виде

$$[Jo] = \exp \left(-\text{const} \cdot (\pi_1)^{\text{производств}}, (\pi_2)^{\text{производств}}, \dots, \right.$$

$$\left. (\pi_n)^{\text{производств}}, \frac{t_0}{R} \right) = \exp(-\text{const} \cdot A),$$

откуда следует, что при известных допусках и посадках на производстве

$$(\pi_i)^{\text{производ}} = \frac{[p_i]}{[p_i] + (\Delta p)_i^{\text{произв}}} < 1$$

или

$$(\pi_j)^{\text{производ}} = \frac{[p_j] - (\Delta p)_j^{\text{производ}}}{[p_j]} < 1,$$

при $t_0 \ll R$,

можно назначить начальное значение $[J_0]$ (некий аналог «качества изготовления») и тем самым определить необходимую константу. Тогда соотношение (2) примет вид

$$Jo(t) = \exp \left(\frac{\ln [J_0]}{A} \cdot (\pi_1)^{\text{эксплуат}}, \right.$$

$$\left. (\pi_2)^{\text{эксплуат}}, \dots, (\pi_n)^{\text{эксплуат}}, \bar{t} \right),$$

откуда следует, что при изменении в процессе эксплуатации проектных значений технических параметров

$$(\pi_i)^{\text{эксплуат}} = \frac{[p_i]}{[p_i] + (\Delta p)_i^{\text{эксплуат}}} < 1$$

и

$$(\pi_j)^{\text{эксплуат}} = \frac{[p_j] - (\Delta p)_j^{\text{эксплуат}}}{[p_j]} < 1$$

удается оценить значение показателя работоспособности машины в целом.

Разработка модели

Поиск внутренних, недоступных без разборки, технических параметров машины (p_p, p_j), деградирующих при эксплуатации, может быть заменен определением внешних параметров, доступных для методов неразрушающего контроля (q_p, q_j) [4]. Наиболее известными аналогами такого перехода являются результаты молекулярно-кинетической теории, где параметры движения молекул заменены внешними, такими как давление и температура. Используя математическую модель функционирования системы машин стрелового типа с гидравлическим приводом, удастся выявить связь между изменением внутренних параметров машины и внешними параметрами функционирования. Такая математическая модель состоит из проектной (идеальной) модели, для которой все параметры соответствуют началу эксплуатации, а также математической модели, описывающей процессы деградации конструкционных материалов и рабочей жидкости грузоподъемной машины. Комплексная математическая модель функционирования грузоподъемной машины позволяет имитировать реальные

процессы эксплуатации, а также является средством для определения номенклатуры и технических параметров необходимых приборов неразрушающего контроля, которым следует оснастить машину.

Разработанная математическая модель динамики подъема стрелы грузоподъемной машины представляет собой систему дифференциальных уравнений для расчета параметров углового движения стрелы. Она учитывает моменты, участвующие в процессе движения: весовой момент инерции поднимаемой системы J , момент, развиваемый домкратом $M_2(\varphi)$, момент от сил трения в штоке $MT(\varphi)$, момент от трения в цапфах гидравлического домкрата $MTP(\varphi)$, момент от колебаний жесткой платформы $MC(\varphi)$, момент уравнивания от тормозного гидравлического домкрата $MM(\varphi)$, а также момент от грузовой нагрузки $M_1(\varphi)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi}{dt} = \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^6 M_i(\varphi(t))}{J} = \frac{M_2(\varphi(t)) - M_1(\varphi(t)) - MT(\varphi(t)) - MTP(\varphi(t)) - MC(\varphi(t)) - MM(\varphi(t))}{J}, \\ \frac{dP}{dt} = \frac{Eg(P(t), \alpha)}{f(l_0 + l) - Q_{утечек}(t) \cdot t} \cdot \frac{dV}{dt}, \end{array} \right. (3)$$

где φ – угол поворота стрелы; ω – угловая скорость движения стрелы; $P(t)$ – давление рабочей жидкости в гидравлической системе привода подъема стрелы; $Eg(P(t), \alpha)$ – модуль упругости рабочей жидкости; α – процентное содержание воздуха в рабочей жидкости; f – площадь поршня гидравлического домкрата; l_0, l – начальное и текущее значения длин поршневой полости домкрата.

Первые два уравнения этой системы решались совместно с уравнением сжимаемости рабочей жидкости, изменение объема V , который в гидравлическом домкрате оценивается по соотношению [1]

$$\frac{dV}{dt} = \left(QT(t) - \frac{dl}{dt} f - Q_{утечек}(t) \right),$$

здесь $QT(t)$ – теоретический расход рабочей жидкости, создаваемый насосом; $Q_{утечек}(t)$ – объемный расход рабочей жидкости в уплотнениях домкрата.

Модель деградации технических параметров системы подъема стрелы охватывала процессы старения, коррозии, износа и остаточной деформации элементов машины. Математическая модель деградации

представлена линейными зависимостями соответствующих параметров. Такое решение принято на основании проведенных исследований, где факторы деградации описываются экспоненциальными зависимостями (более подробно [2]), т.е. изменения технических параметров машины (p_i) должны изменяться в незначительных, назначенных разработчиком диапазонах. В эту модель вошли следующие линейные соотношения.

Объемный коэффициент полезного действия насоса $\eta_{факт} = k_{\eta} \cdot \eta_{ном}$; $k_{\eta} \in 1...0,95$.

Эксцентриситет плунжерного гидравлического насоса $e_{факт} = k_e \cdot e_{ном}$; $k_e \in 1...0,95$.

Коэффициент трения в цапфах домкрата $k_{тр, факт} = k_{ктр} \cdot k_{тр, ном}$; $k_{ктр} \in 1...1,2$.

Радиус цапфы домкрата $r_{р, факт} = k_{rp} \cdot r_{р, ном}$; $k_{rp} \in 1...1,1$.

Напряжение в смятом уплотнении дом-

крата (σ_s) $\sigma_{с, факт} = k_{\sigma} \cdot \sigma_{с, ном}$; $k_{\sigma} \in 1...0,95$.

Толщина листовой стали металлоконструкции стрелы $\delta_{факт} = k_{\delta} \cdot \delta_{ном}$; $k_{\delta} \in 1...0,95$.

Шероховатость зеркала цилиндра $RA_{факт} = k_{RA} \cdot RA_{ном}$; $k_{RA} \in 1...1,1$.

Геометрия механизма подъема стрелы (x_i) $x_{i, факт} = k_{x_i} \cdot x_{i, ном}$; $k_{x_i} \in 1...1,05$; $i = 1, 2, 3$.

Модуль упругости металла стрелы $E_{факт} = k_{EM} \cdot E_{ном}$; $k_{EM} \in 1...0,95$.

Модуль упругости резины уплотнений домкрата $E_{р, факт} = k_{EP} \cdot E_{р, ном}$; $k_{EP} \in 1...0,95$.

Модуль упругости рабочей жидкости $E_{г, факт} = k_g \cdot E_{г, ном}$; $k_g \in 1...0,95$.

Динамическая вязкость рабочей жидкости $\mu_{факт} = k_{\mu} \cdot \mu_{ном}$; $k_{\mu} \in 1...0,95$.

Процентное содержание воздуха в рабочей жидкости $\alpha_{факт} = k_{\alpha} \cdot \alpha_{ном}$; $k_{\alpha} \in 1...1,2$.

При моделировании процессов функционирования использовались геометрические и режимные параметры, соответствующие реальному объекту исследования. Верификация математической модели выполнена путем сравнения реальных технических параметров, таких как время подъема стрелы и значение давления рабочей жидкости,

с модельными, получаемыми в результате численных экспериментов.

Расчеты, выполненные на основе представленной выше математической модели функционирования грузоподъемной машины, показали, что характерные зависимости «внешних» параметров процесса подъема стрелы (угол подъема, угловая скорость и давление рабочей жидкости) имеют колебательный характер. Поскольку прямое оценивание изменения «внутренних» технических параметров системы подъема стрелы по осциллограммам давления рабочей жидкости и угловой скорости подъема не дали положительного результата, то для расшифровки осциллограмм использовались стандартные процедуры спектрального анализа (вейвлет-преобразования). Сущность такой дешифровки состояла в том, что на вейвлет-графиках искались линейные изменения в значениях коэффициентов вейвлет-преобразований, соответствующие линейным изменениям деградирующих технических параметров системы подъема стрелы.

В результате получены следующие линейные зависимости «внутренних» параметров системы подъема и их «внешних» проявлений в вейвлет-графиках осциллограмм давления рабочей жидкости, и угловой скорости подъема, с учетом изменения соответствующего вейвлет-коэффициента осциллограммы:

- изменение модуля упругости уплотнений домкрата;
- изменение трения в цапфах домкрата;
- изменение давление прижатия манжет домкрата;
- изменение толщины листового металла конструкции стрелы;
- изменение жесткости пружин в клапанах насоса;
- изменение эксцентриситета вала плунжерного насоса;
- изменения настройки предохранительного клапана;
- изменение концентрации воздуха в рабочей жидкости;
- изменение КПД насоса и времени подъема стрелы;
- изменение зазора в плунжерных парах насоса.

Выводы

Полученные результаты позволяют оценить фактическое техническое состояние системы подъема стрелы и дать прогнозные оценки динамики деградации системы. Такого рода оценивание основано на том, что между изменением значений физических параметров системы подъема стрелы и значений, соответствующих вейвлет-коэффи-

циентов ($C_{i=s}^{(7)}$) имеется прямо пропорциональная связь. Для параметров, имеющих рост значений в процессе эксплуатации, она представляется в виде

$$p_i = [p_i] + \Delta p_i \sim C_{i=s}^{(7)} + \Delta C_{i=s}^{(7)}.$$

Для параметров, имеющих снижение значений в процессе эксплуатации, такая зависимость имеет вид

$$p_j = [p_j] - \Delta p_j \sim C_{j=s}^{(7)} - \Delta C_{j=s}^{(7)},$$

что позволяет записать соотношения для внутренних технических параметров машины

$$\bar{p}_i = \frac{[p_i]}{p_i} = a_i^{\text{экспер}} \frac{C_{i=s}^{(7)}}{C_{i=s}^{(7)}}$$

и

$$\bar{p}_j = \frac{p_j}{[p_j]} = b_j^{\text{экспер}} \frac{C_{j=r}^{(7)}}{C_{j=r}^{(7)}}$$

где $a_i^{\text{экспер}}$, $b_j^{\text{экспер}}$ – коэффициенты пропорциональности, полученные в результате численных экспериментов.

Таким образом, по результатам дешифровки осциллограмм давления и (или) угловой скорости подъема удается рассчитать численное значение показателя работоспособности

$$Jo(\bar{t}) = \exp\left(\frac{\ln[Jo]}{A} \cdot \prod_{i=1}^n \bar{p}_i \cdot \prod_{j=1}^m \bar{p}_j \cdot \bar{t}\right).$$

На основании численных расчетов, с варьированием степени деградации технических параметров, сформирован банк данных по ситуациям деградации внутренних технических параметров системы подъема стрелы и их внешних проявлений.

Дешифрованные осциллограммы информативных «внешних» параметров, полученных при имитационном моделировании и хранящиеся в ситуационном банке данных, позволяют сравнивать их с дешифрованными осциллограммами тех же параметров, измеренных на эксплуатируемом объекте. В результате такого сравнения удается установить значения «внутренних» параметров эксплуатируемой машины без разборки машины и сделать выводы о ее техническом состоянии. Достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, опубликованными в работах [2, 3, 5], в которых авторы исследовали подобные узлы и детали других машин и механизмов.

Список литературы

1. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
2. Гранкин Б.К. Оценивание работоспособности гидравлических машин объемного действия стартовых космических комплексов / Б.К. Гранкин, В.В. Козлов, Д.О. Мокан, В.Е. Прохорович // Приложение к журналу «Мехатроника, автоматизация, управление» управление и информатика в авиакосмических системах. – М.: Новые технологии, 2007. – Вып. 11. – С. 2–12.
3. Гранкин Б.К. Оценивание работоспособности гидравлических приводов пусковых установок зенитно-ракетных комплексов / Б.К. Гранкин, В.В. Козлов, Д.О. Мокан, У.Аль-Вароуди // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Военно-Морской Флот России: сборник трудов XVI Всероссийской научно-практической конференции РАРАН 3-6 апреля 2013. – СПб.: ФГБУ «РАРАН», 2013. – Т. 4. – С. 403–407.
4. Козлов В.В. Обоснование номенклатуры комплексных показателей качества функционирования системы эксплуатации механического оборудования / В.В. Козлов, И.О. Кукушкин, Д.О. Мокан; ВКА имени А.Ф. Можайского. – М., 2012. – 112 с. – Деп. в ЦСИФ МО РФ 01.06.2012, № В7400.
5. Козлов В.В., Гранкин Б.К., Сулаберидзе Д.В. Контроль технического состояния зубчатых передач уникальной техники // Вестник МГТУ ГА. – 2009. – Вып. 141. – С. 25–33.
6. Научная концепция эксплуатации стартовых комплексов космического назначения за пределами назначенных показателей ресурса и срока службы. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 1998. – 124 с.
7. Петров Г.Д. Методологические аспекты обеспечения долговечности механического оборудования стартовых комплексов на основе функционального мониторинга. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 201 с.

References

1. Bashta T.M. *Mashinostroitel'naya gidravlika*. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 672 p.
2. Grankin B.K., Kozlov V.V., Mokan D.O., Prokhorovich V.E. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2007, no. 11, pp. 2–12.
3. Grankin B.K., Kozlov V.V., Mokan D.O., Al-Varoudi U. *Trudy 16 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnye problemy zaschity i bezopasnosti RARAN»* Sankt-Peterburg, 2013, pp. 403–407.
4. Kozlov V.V., Kukushkin I.O., Mokan D.O. *Tsentralnyi spravochno-informatsionnyy fond Ministerstva Oborony Russian Federation*, Moscow, 2012. 112 p.
5. Kozlov V.V., Grankin B.K., Sulaberidze D.V. *Vestnik MGTU GA*, 2009, no. 141, pp. 23–31.
6. *Nauchnaya kontseptsyya ekspluatatsii startovykh kompleksov kosmicheskogo naznacheniya za predelami naznachennykh pokazateley resursa i sroka sluzhby*. Sankt-Peterburg: VIKА imeni A.F. Mozhayskogo, 1998. 124 p.
7. Petrov G.D. *Metodologicheskie aspekty obespecheniya dolgovechnosti mekhanicheskogo oborudovaniya na osnove aunktsonalnogo monitoringa*. Sankt-Peterburg: VIKА imeni A.F. Mozhayskogo, 2005. 201 p.

Рецензенты:

- Аверкиев Н.Ф., д.т.н., профессор кафедры, ФГКВООУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург;
 Садин Д.В., д.т.н., профессор кафедры, ФГКВООУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург.