

2. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. Mechatronic approaches to the elastic vibratory systems dynamics. Novosibirsk: Nauka. 2010. 436 s.

3. Geller Yu. A., Balandin O.A. Effect of elastic centrifugal properties of earth-moving machines on the dynamic antihunting // *Sovremennye tehnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye*. 2012. Vyp. 2 (34). S. 64-71.

4. Geller Yu. A. Energy-efficient machine class operating on the principle of dynamic loads closure on ripper's equipment // *Resursovoiproiz-*

vodyashchiye, malootkhodnye i prirodookhrannyye tekhnologii osvoiniya nedr: sb. st. IX Mezhdunar. konf. M.: Kotonu [Benin], 2010. S. 257-259.

5. Geller Yu. A. Active means of the earth-moving machines vibration protection by the example of a ripper equipped with an energy storage device // *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh. Vseukrainsky nauchno-tekhnichesky zhurnal*. Ukraina. 2012. Vyp. 2 (66). S.105-111.

6. GOST (The State Standard) 12.1.012-90. The system of standard documents for work safety. Vibration safety. General requirements. M.: Standartinform. 2008, 20 s.

УДК 631.173.4.004.5

Пути и способы обеспечения гарантированной безопасности эксплуатации грузоподъемных машин

С.П. Озорнин^a, А.В. Якимов^b

Забайкальский государственный университет, ул. Александрo-Заводская 30, Чита, Россия

^asozornin54@mail.ru, ^bartuomsci@gmail.com.

Статья получена 2.12.2012, принята 12.02.2013

Рассмотрена проблема обеспечения безопасности применения грузоподъемных машин (ГПМ) в связи с изменившимися требованиями к отслеживанию процессов их нагружения и условиям эксплуатации в части проведения технического обслуживания и ремонта. Показана эволюция расчетных методов оценки остаточного ресурса ГПМ и установления критериев оценки технического состояния металлических конструкций. Исследования, проводимые с целью создания методик оценки величины остаточного ресурса металлических конструкций кранов, выявили необходимость организации непрерывного контроля (мониторинга) изменений технического состояния ГПМ в рамках технического сервиса. Это требует повышения качественного уровня сервисных услуг владельцам грузоподъемных машин, что может быть реализовано посредством использования новых концепций, программ, методов и средств, в том числе с применением современных инструментов и систем, с учетом эффективного использования имеющихся ресурсов. Поэтому в основу современных систем управления производственными и технологическими процессами в сфере технического сервиса грузоподъемных машин предлагается закладывать систему управления рисками.

Ключевые слова: остаточный ресурс, металлическая конструкция, процесс изменения технического состояния, нейросетевая модель, пакеты сервисных услуг, система управления рисками, программа технического сервиса.

Means and ways to provide assured safety of lifting equipment operation

S.P. Ozornin^a, A.V. Yakimov^b

Transbaikal State University, 30, Alexandro-Zavodskaya str., Chita, Russia

^asozornin54@mail.ru, ^bartuomsci@gmail.com.

Received 2.12.2012, accepted 12.02.2013

Due to the changes in the requirements to the processes of lifting equipment loading and the operating conditions concerning monitoring their maintenance and repair, the problem of providing lifting equipment operation safety has been reviewed. The evolution of computational methods to assess the lifting equipment residual life and establish the criteria to assess metal structures operating condition have been analyzed. The research conducted to develop the procedures to assess the residual life of cranes metal structures has revealed the necessity for organizing continuous monitoring of the changes in the lifting equipment operating condition within the framework of maintenance service. Therefore, a higher qualitative level of the lifting equipment maintenance is required and it is achieved by means of new concepts, programs, methods and means including the application of modern tools and systems and taking into consideration the available resources effective use. That is why it is proposed to introduce the risks management system into modern industrial and technological management processes systems in the sphere of lifting equipment maintenance.

Key words: residual life, metal structure, process of operating condition change, connectionist model, service pack, risk management system, maintenance service program.

Обеспечение гарантированной безопасности эксплуатации грузоподъемных машин (ГПМ) требует непрерывного контроля за изменениями их технического состояния, а также повышения качественного уровня оказания сервисных услуг. В подавляющем большинстве случаев безопасность обеспечивается при выполнении операций подъема, перемещения и опускания груза работоспособными грузоподъемными машинами, не имеющими приобретенных (накопленных усталостных) дефектов металлических конструкций. Наиболее сложной задачей является аналитическое определение остаточного ресурса таких конструкций. Результаты расчетов, даже при использовании в качестве исходных данных информации, записываемой регистраторами параметров, не могут заменить непосредственный контроль за состоянием конструкций. Причина кроется в абстрактности расчетных моделей, используемых для исследования усталостных изменений.

Серьезным шагом в рассматриваемом направлении исследований стало появление программного продукта Relics, в основу которого заложены законы механики разрушения, т. е., в отличие от подхода с использованием характеристического числа, непосредственно анализируется состояние металлической конструкции [1]. В качестве исходных данных используются не только значения массы грузов и количество рабочих циклов, но и скорость работы механизмов, координаты положения рабочих органов, геометрия металлической конструкции крана и его конструктивных элементов, агрессивность окружающей среды [1]. Однако ряд недостатков, отмеченных в [2], ограничивает использование этого программного продукта.

Здесь возникает очередная проблема, связанная с моделированием процессов, в которых масштабы изменения значений отдельных параметров разнятся между собой на несколько порядков.

Нами была предпринята попытка исключить неточность расчетов, связанную с обобщением параметров технологического цикла ГПМ. В этой связи появляется необходимость в оценке величин напряжений для множества различных ситуаций, что не предусмотрено в Relics. Использование встроенного расчетного модуля, основанного на стержневой конечно-элементной модели, весьма ограничено по функциональным возможностям и значительно снижает скорость работы программы. Наибольший интерес в данном случае представляет использование внешних данных, т. е. результатов тензометрических измерений или конечно-элементного анализа, выполненного в профессиональных программных пакетах. Для использования имеющейся информации нужен механизм, который осуществлял бы выбор соответствующих значений из массивов и выполнял их аппроксимацию. Решение найдено в применении нейросетевых моделей, а именно в перцептронах.

Нейросетевые модели позволяют выделить характерные зависимости между параметрами, описывающими процесс, например, величину напряжения в одном из сечений металлической конструкции ГПМ в зависимости от массы груза и / или положения грузовой каретки. Перед использованием необходима предварительная подготовка нейронной сети, которая за-

ключается в корректировке внутренних параметров структуры сети на основании значений ее внешних параметров [2].

Все исследования, проводимые с целью создания методик оценки величины остаточного ресурса металлических конструкций кранов, приводят к тому, что необходимо организовывать непрерывный контроль (мониторинг) изменений технического состояния ГПМ. Это требует повышения качественного уровня сервисных услуг владельцам грузоподъемных машин, что может быть реализовано при использовании новых концепций, программ, методов и средств, в том числе с применением современных инструментов и систем, с учетом эффективного использования имеющихся ресурсов. Именно поэтому в основу современных систем управления производственными и технологическими процессами в сфере технического сервиса грузоподъемных машин должна закладываться система управления рисками. Она позволяет сформировать и предложить эксплуатантам (владельцам ГПМ) такую систему технического обслуживания, которая, как минимум, будет обеспечивать безопасность эксплуатации грузоподъемной машины и, как максимум, – работоспособное состояние этой машины. Поскольку техническое состояние грузоподъемных машин претерпевает постоянные изменения под воздействием эксплуатационных факторов, задачей любой сервисной организации является информирование потребителей услуг о возможной потере работоспособности ГПМ, тем более, о потенциальных рисках их эксплуатации. Для исключения (или снижения уровня) подобных рисков эксплуатантам предлагаются экономически обоснованные системы технического обслуживания различной стоимости.

Риск как физическая категория должен оцениваться двумерным множеством показателей: 1) степень риска (частота из статистики событий, вероятность при апрорных оценках или экспертный показатель); 2) значимость последствий, или ущерба (цена, или величина, риска).

Степень риска – это мера неопределенности появления негативного результата, которая отражает случайный характер процессов эксплуатации грузоподъемных машин. Источниками неопределенности являются неполнота, недостаточность наших знаний об объекте обслуживания и системах управления процессами.

Неопределенность означает недостаток информации о возможных событиях, тогда как риск – это ситуация, в которой люди, принимающие решения, точно не знают, что случится, но могут предположить каждый из возможных исходов и дать им финансовую оценку.

Большинство аварий и возникновение значительного ущерба от необратимых изменений технического состояния грузоподъемных машин инициируются процессами появления начальных повреждений несущих металлических конструкций (базовых, силовых элементов), т. е. высокорисковых объектов. Эти процессы создают цепочку развивающихся опасностей «повреждения → отказы → разрушение → аварии (значительные материальные потери)». Наибольшие ущербы и риски относятся к последним элементам этой цепочки.

Для анализа проблемы измерения рисков в сфере эксплуатации грузоподъемных машин и деятельности сервисных организаций (СО) обозначим риск R и будем считать его опасным, нежелательным случайным событием, последствия которого проявляются в виде ущерба UR . Действия эксплуатантов и сервисных организаций, приводящие к изменению технического состояния грузоподъемных машин, будем считать рискованными, если имеющиеся технические средства не обеспечивают необходимую безопасность эксплуатации или приводят к значительным экономическим потерям. Из этого следует, что риск аварии есть событие с последствиями, характерными для рискованного события. Это дает возможность преобразовать понятие меры опасности, вложенное в смысл слова «риск», в более строгое понятие события. При этом меру риска можем определять с использованием пространства исходов.

Таким образом, риск серьезных изменений технического состояния машин при нарушении правил их эксплуатации или несоблюдении регламента техобслуживания и ремонта (ТО и Р) сервисными организациями представим в виде завершающего, случайного, редкого (маловероятного) события R в виде цепочки CR , состоящей из случайных элементарных неблагоприятных событий. Цепочки формируются с использованием методов комбинаторики элементарных событий на дереве отказов.

Пространство исходов образуется частными исходами каждой рискованной цепочки CR , которые представляются в виде событий R с ущербом UR , т. е. UR является ценой риска рискованной цепочки CR . При этом ущерб UR может иметь стоимостный эквивалент в виде материальных потерь (потери техники, грузов, прибыли и т. п.).

Тогда риск – это математическое ожидание ущерба UR от цепочки неблагоприятных событий CR при их числе: $t = \{1, n\}$.

$$M(UR) = \sum_{i=1}^n p_i \eta_i \quad (1)$$

где p_i – вероятность случайного события R_i ; η_i – «весовое» значение события в получении ущерба.

Риск серьезных изменений технического состояния металлических конструкций ГПМ включает в себя свойства случайных событий и отражает некоторые дополнительные свойства, зависящие от природы изучаемого случайного события, а именно: имеется мера опасности, т. е. доступно измерение риска с мерой опасности MR ; человеческий фактор выступает как элемент общей системной ошибки в цепочке случайных событий; случайное событие типа риска наносит ущерб или вред. При этом основой безопасности эксплуатации грузоподъемных машин необходимо считать умение прогнозировать нежелательные явления и дестабилизирующие факторы, рассчитывать риск принимаемых решений по недопущению и предотвращению ущерба. Таким образом, необходимо прогнозировать не только последствия принимаемых управленческих решений, но и последствия бездействия и / или неэффективности систем управления в сфере производственно-технической эксплуатации грузоподъемных машин.

С целью повышения эффективности производственно-технической эксплуатации грузоподъемных машин нами предлагается формировать систему управления рисками на основе гибких систем технического обслуживания, предлагаемых для владельцев ГПМ и реализуемых сервисными организациями в виде программ технического сервиса (ПТС).

Предложены следующие этапы формирования ПТС.

1. **Идентификация** – осуществление выбора контролируемых параметров, в пространстве которых будет осуществляться описание процессов управления техническим состоянием грузоподъемных машин, обоснование структуры объекта управления (техническое состояние металлической конструкции ГПМ) и динамики его изменения. На этом же этапе формируется система ключевых индикаторов, обеспечивающих раннее обнаружение нежелательных процессов изменения технического состояния металлической конструкции ГПМ.

2. **Мониторинг** – постоянное наблюдение за поведением грузоподъемных машин с целью немедленного обнаружения нештатных ситуаций, чреватых возможной опасностью нежелательного изменения технического состояния или аварии. На этом этапе должны измеряться значения параметров и ключевых индикаторов, определенных на предшествующем этапе.

3. **Анализ** – осуществление диагностики состояния металлической конструкции ГПМ и восстановление (при необходимости) последовательности смены состояний при развитии аварийных процессов. Это, по сути, является оценкой ситуации, складывающейся из текущих и предшествующих значений контролируемых параметров объекта управления (металлической конструкции ГПМ) или процесса технического сервиса (ТО и Р), совокупности действующих на объект управляющих воздействий и дестабилизирующих факторов.

4. **Прогноз** – выполнение причинно-следственного анализа с расчетом рисков отдельных событий и цепочек событий. На этом этапе производится анализ основных бизнес-процессов в сфере эксплуатации грузоподъемных машин и их технического сервиса в СО, выбор способов управления этими процессами и путей достижения желаемых результатов управления. На этом же этапе (при необходимости) может быть выполнена оптимизация процессов управления при заданных целевых функциях.

5. **FMEA-анализ** (*failure mode and effects analysis* – анализ видов и последствий отказов) – в данном случае, выполнение анализа видов и последствий потенциальных отказов грузоподъемных машин или системы их технического сервиса. По сути, FMEA-анализ является одной из стандартных технологий анализа качества изделий и технологических процессов. Удобство его применения заключается в использовании типовых форм представления результатов анализа и типовых правил его проведения. На этапе разработки с применением метода FMEA появляются возможности: а) обнаружить слабые места технологических процессов и принять меры по их устранению; б) принять решения о пригодности предложенных и альтернативных процессов и оборудования; в) доработать технологические процессы до наиболее приемлемого с различных точек

зрения уровня, а именно надежности, безопасности для персонала; г) обнаружить потенциально дефектные технологические операции; д) определить группы технологических операций.

6. **Моделирование** – формирование диалоговой программной системы для формализации знаний предметных экспертов и результатов выполненного анализа с целью построения феноменологической компьютерной модели процессов эксплуатации грузоподъемных машин и их технического сервиса. Модель должна отражать знания экспертов об идентификации объектов управления, их свойствах, динамических характеристиках, т. е. управляемости и реакции на различные нарушения и дестабилизирующие факторы. Модель также может быть представлена с помощью системы уравнений.

Способ формализации объектов и процессов определяется их свойствами, целями управления, динамическими характеристиками и потребительской чувствительностью предлагаемых решений.

Объект управления, в данном случае процесс *изменения технического состояния металлических конструкций* (ИТСМК) при эксплуатации грузоподъемных машин, может быть представлен совокупностью всех правильных комбинаций технологических операций ТО, объединенных в пакеты, т. е. совокупностью его компонент, которыми являются входы X и выходы Y .

$$\text{ИТСМК} \subset X \times Y. \quad (2)$$

Входы объекта X – это все воздействия на объект, управляющие и дестабилизирующие; выходы Y – это значения контролируемых параметров, значения ключевых показателей, выявленные и выбранные на стадии идентификации.

В этом случае в качестве модели объекта мы вправе выбрать преобразование Φ , связывающее входы X с выходами Y :

$$\Phi: X \rightarrow Y. \quad (3)$$

Таким образом, задачей построения модели Φ является установление зависимостей $X \rightarrow Y$, т. е. *причина* \rightarrow *следствие*.

Причинами X изменения ситуаций в процессе эксплуатации грузоподъемных машин являются различные воздействия внешнего $X_{\text{вн1}}, X_{\text{вн2}} \subset X$ и внутреннего $X_{\text{внтр1}}, X_{\text{внтр2}} \rightarrow X$ порядка, которые испытывает объект управления ИТСМК. Внутренними $X_{\text{внтр}}$ воздействиями могут быть отказы грузоподъемных машин, обусловленные неисправностями основных и вспомогательных систем. Внешние воздействия $X_{\text{вн}}$ могут быть преднамеренные и непреднамеренные. К первым относят все управляющие воздействия $X_{\text{ИТС}} \subset X_{\text{вн}}$ на объект управления ИТСМК с целью скорректировать его текущее состояние $q^t \in Q$, в том числе и ошибочные. Ко вторым $X_s \subset X_{\text{вн}}$ можно отнести различные природные явления (резкие изменения температуры и скорости ветра, повышенная влажность воздуха, снегопад и т. п.).

С использованием выражений (1) и (3) определены степени риска аварийных ситуаций или возмож-

ных значительных материальных потерь при различных вариантах производственно-технической эксплуатации ГПМ. По каждому варианту пакетов сервисных услуг владельцам ГПМ предоставляется возможность ознакомления со стоимостью их реализации и степенью риска неблагоприятных последствий.

В качестве примера в табл. 1 приведены варианты пакетов сервисных услуг (ПТВ) и их оценочные параметры.

Таблица 1

Варианты ПТВ	Базовый	Повышенный 1	Повышенный 2	Пониженный	Усредненный
Ориентировочная себестоимость, тыс. руб.	4,8	5,2	6,0	3,5	4,9
Ориентировочная стоимость для клиента, тыс. руб.	5,8	6,7	7,5	4,5	5,9
Степень риска неблагоприятных последствий	0,15	0,10	0,05	0,20	0,13

Предварительная оценка экономической эффективности использования пакетных технологий в системе технического сервиса ГПМ при организации их ТО и Р позволяет сделать вывод о том, что затраты, по сравнению с методом плано-предупредительного обслуживания, сокращаются практически на 45 ... 50 %. Значительно повышается безопасность эксплуатации ГПМ и привлекательность сервисных услуг для их владельцев, поскольку им предоставляется право самостоятельно выбирать приемлемые, по их мнению, пакеты услуг ТС. Несмотря на пока еще значительную стоимость аппаратного и программного обеспечения диагностического мониторинга и формирования пакетных технологий, срок их окупаемости оказывается уже вполне приемлемым для многих строительных предприятий и фирм, эксплуатирующих ГПМ различных типов.

Литература

1. Озорнин С.П., Якимов А.В. Совершенствование методики оценки остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин // Механизация строительства. 2011. № 12. С. 8-10.
2. Озорнин С.П., Якимов А.В. Построение и обучение многослойных перцептронов для моделирования напряженного состояния металлических конструкций грузоподъемных машин // Вестн. ИРГТУ. 2012. № 6. С. 21-25.

References

1. Ozornin S.P., Yakimov A.V. The technique improvement to assess the hoisting machines metalwork remaining life // Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2011. № 12. S. 8-10.
2. Ozornin S.P., Yakimov A.V. Perceptron construction and training to model the hoisting machines metalwork stress // Vestn. IRGTU. 2012. № 6. S. 21-25.