

М. А. Степанова, С. А. Сытник, А. П. Кирпичников,
В. В. Мокшин

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕМОНТА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Ключевые слова: Регрессионный анализ, отбор значимых признаков, моделирование сложных систем, ремонт грузоподъемных механизмов.

Поломка грузоподъемных механизмов (ГПМ) является актуальной проблемой. Для проведения ремонта требуется проводить ряд работ, определять количество специалистов, необходимых для участия в ремонтных работах. В статье предлагается метод, основанный на построении регрессионной модели, представляющей зависимости результативных показателей эффективности от входных факторов. Для отбора значимых факторов используется метод, основанный на параллельном генетическом алгоритме. Затем, учитывая ограничения на входные факторы и результативные показатели, решается оптимизационная задача с целью определения наилучших значений входных факторов и результативных показателей.

Keywords: Regression analysis, the selection of significant features, simulation of complex systems, repair of hoisting.

Damage to hoisting (PMG) is an important issue. For repair service is required to conduct a series of works to determine the number of specialists required to participate in repair work. The paper proposes a method based on the construction of a regression model is the dependence of efficient performance of the input factors. For selection of relevant factors method based on Parallel Genetic Algorithms. Then, given the constraints on the input factors and the effective indexes, optimization problem is solved to determine the best values of the input factors and output indicators.

Введение

Для диагностики технического состояния ГПМ, в частности для выявления опасных зарождающихся и развивающихся дефектов различной природы может быть эффективно использован метод акустической эмиссии (АЭ) [1]. Используются методы магнитной памяти металла, радиационный метод, капиллярный метод, вихретоковый метод, визуальный метод, ультразвуковой метод и т.д. [2] По всем этим методам разработаны ГОСТы и методики. На сегодняшний день неотъемлемой задачей является установка регистраторов параметров на ГПМ. Однако в полной мере получаемая информация с регистраторов при диагностике не используется. Поэтому разработка системы мониторинга и анализа регистрируемых параметров является актуальной. Учитывая тот факт, что система является сложной, то ее можно рассматривать в качестве многофакторной, а для моделирования использовать регрессионный метод, основанный на выделении значимых признаков, описывающих результативные показатели [3-5]. Проблема выделения значимых признаков актуальна и в других областях, например, распознавание образов [6]. Рассмотрим вопрос формирования модели с отбором значимых признаков для оптимизации ремонта ГПМ.

Методика моделирования

Грузоподъемные машины в настоящее время являются одним из основных видов оборудования каждого строительного предприятия. Они используются как для погрузочно-разгрузочных работ, так и при строительстве различных объектов. ГПМ относятся к оборудованию повышенной опасности, и их

содержание в исправном состоянии является важнейшим условием их безопасной эксплуатации. Ремонт ГПМ является сложным и трудоемким процессом. Ремонтные работы по восстановлению кранов функционально в укрупненном плане подразделяются на четыре вида: механические, гидравлические, электромонтажные и приборные.

Цель данной работы состоит в повышении эффективности процесса ремонта ГПМ за счет уменьшения потерь специализированных организаций по ремонту, а также в повышении уровня занятости работников службы эксплуатационного сопровождения. Это обеспечивает минимизацию потерь предприятий эксплуатирующих краны и максимизацию доходов предприятий, осуществляющих их ремонт. В данной работе рассмотрен ремонт пяти видов кранов: стреловых, башенных, козловых, мостовых и вышек.

Для моделирования и оптимизации процесса ремонта предлагается технология, состоящая из следующих 12 этапов [4].

1. Выбор совокупностей результативных показателей эффективности процесса ремонта грузоподъемных машин и влияющих на них оптимизируемых и объективных факторов.

2. Математическая постановка задач.

3. Построение IDEF-диаграмм процессов в системе BPwin и их качественный анализ.

4. Разработка и отладка имитационной модели в системе GPSS W.

5. Составление стратегического плана проведения имитационных экспериментов.

6. Определение требуемого количества реализаций состояния модели для получения результатов с заданной достоверностью.

7. Моделирование процессов по стратегическому плану.

8. Построение математической модели, состоящей из совокупности уравнений регрессии, связывающих результативные показатели эффективности бизнес-процессов с влияющими на них факторами.

9. Оценка степени влияния факторов на результативные показатели эффективности моделируемых бизнес-процессов.

10. Оптимизация бизнес-процессов.

11. Вывод формул для вычисления оптимального количества рабочих по ремонту грузоподъемных кранов.

12. Проведение экспериментов.

Далее последовательно рассмотрим все выделенные этапы.

1. Для исследования процессов отобраны 6 результативных показателей эффективности и 9 влияющих на них факторов. Первые четыре фактора, которые мы можем менять для обеспечения требуемых значений откликов, будем называть оптимизируемыми факторами. Остальные факторы мы не имеем возможности менять сами, и они меняются независимо от наших желаний, их будем называть объективными факторами. Перечень отобранных показателей приведен в таблице 1.

Таблица 1

Обозначение	Наименование
y_1	Потери предприятия от ремонта кранов за вычетом расходов на заработную плату работников за период обслуживания кранов
y_2	Среднее время ремонта (в часах) ГПМ
y_3	Стандартное отклонение времени ремонта (в часах) ГПМ
y_4	Время ожидания ремонта (в часах) ГПМ
y_5	Средняя длина очереди на ремонт (в часах) ГПМ
x_1	Количество ремонтников на механических работах, меняется от 2 до 6
x_2	Количество ремонтников на гидравлических работах, меняется от 3 до 5
x_3	Количество ремонтников на электромонтажных работах, меняется от 2 до 4
x_4	Количество наладчиков приборов безопасности, меняется от 2 до 4
x_5	Количество обслуживаемых вышек, меняется от 40 до 100
x_6	Количество обслуживаемых стреловых кранов, меняется от 300 до 400
x_7	Количество обслуживаемых башенных кранов, меняется от 100 до 200
x_8	Количество обслуживаемых козловых кранов, меняется от 20 до 40
x_9	Количество обслуживаемых мостовых кранов, меняется от 20 до 40

2. Требуется построить математическую модель процесса в виде совокупности уравнений регрессии:

$$y_j = f_j(x_1, \dots, x_9); j = \overline{1, 6}. \quad (1)$$

По математической модели (1) производится постановка оптимизационной задачи:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, \dots, x_9) \rightarrow \min; \\ a_j &\leq f_j(x_1, \dots, x_9) \leq b_j; j = \overline{2, 6}. \quad (2) \\ c_i &\leq x_i \leq d_i; i = \overline{1, 4}; \\ x_i &\rightarrow \text{const}; i = \overline{5, 9}; \end{aligned}$$

где a_j, b_j – левая и правая границы допустимых значений j – го результативного показателя эффективности; c_i, d_i – левая и правая границы допустимых значений i – го фактора;

По результатам оптимизации (2) выводятся расчётные формулы для вычисления оптимальных значений факторов - x_1, x_2, x_3, x_4 :

$$x_i = f_i(x_5, \dots, x_9); i = \overline{1, 4};$$

3. Структурные модели бизнес-процесса ремонта ГПМ разработаны в системе BPWin в виде диаграмм IDEF0 (рис.1) и IDEF3 (рис.2) [7].

На диаграмме A-0, которая представлена на рисунке 1, содержится наиболее общее описание объекта моделирования, то есть информация о том, как и с помощью каких средств, производится ремонт ГПМ.

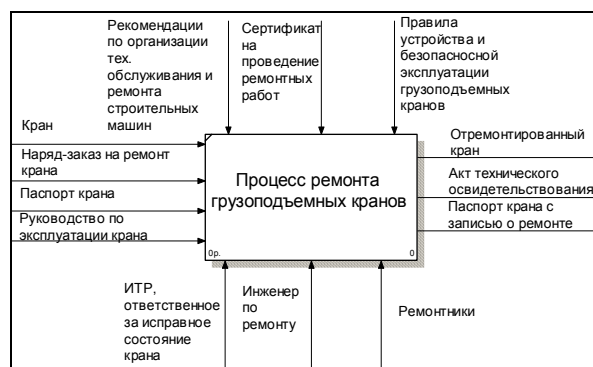


Рис. 1 - Диаграмма A-0. Процесс ремонта грузоподъемных кранов

Модель IDEF3 позволяет представить сценарий информационного процесса (информационной технологии) в виде параллельно-последовательно выполняемых действий. На рисунке 2 представлена структурная схема процесса ремонта. Ремонтные работы подразделяются на четыре вида: механические, гидравлические, электрические и приборные. Стоит отметить, что гидравлические работы выполняются строго после механических, приборные после электрических. По этим двум веткам ремонтные работы можно выполнять в параллельном режиме [8-9].

4. Была разработана и отлажена имитационная модель процесса ремонта ГПМ на языке GPSS W. В модели помимо самого процесса ремонта учитываются заболевания рабочих, выполняющих ремонтные работы.

5. В качестве стратегического принят план, состоящий из 51 варианта. В первом варианте – центральной точке взяты средние значения всех факторов. Ещё 32 варианта в геометрической интерпретации представляют собой вершины пятимерного куба для пяти основных факторов,

четыре остальных – дополнительных факторов меняются по законам изменения произведений основных факторов т.е. реализуется план дробного факторного эксперимента. Для обеспечения отображения возможных нелинейностей в зависимостях результативных показателей эффективности от влияющих на них факторов вводятся 18 «звёздных» точек [10].

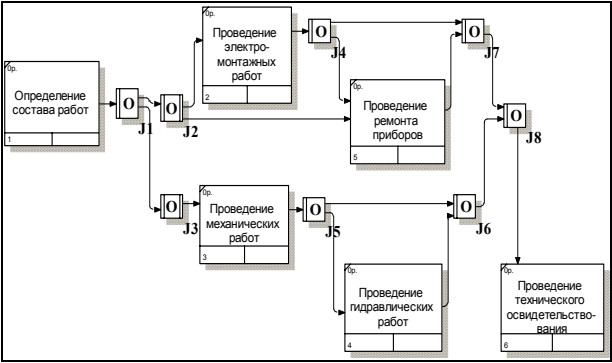


Рис. 2 - Модель IDEF3. Структурная модель процесса ремонта

6. Моделирование процессов проведено в системе GPSS W по 51 варианту. Для примера в таблице 2 приведём результаты моделирования для центральной точки при следующих значениях факторов: $x_1=5$ – количество ремонтников на механических работах; $x_2=4$ – количество ремонтников на гидравлических работах; $x_3=2$ – количество ремонтников на электромонтажных работах; $x_4=2$ – количество наладчиков приборов безопасности; $x_5=40$ –количество обслуживаемых вышек; $x_6=300$ – количество обслуживаемых стреловых кранов; $x_7=100$ – количество обслуживаемых башенных кранов; $x_8=20$ – количество обслуживаемых козловых кранов; $x_9=20$ –количество обслуживаемых мостовых кранов;

Таблица 2 – Результат имитационного моделирования

Код	Наименование	Результат
y_1	Потери предприятия от ремонта кранов за вычетом расходов на заработную плату работников за период обслуживания кранов, руб.;	374035009
y_2	Среднее время ремонта (в часах) ГПМ;	8,34
y_3	Стандартное отклонение времени ремонта (в часах) ГПМ	0,53

7. Коэффициенты линейной корреляции между результативными показателями и производственными факторами определяются по формуле [11]:

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{g=1}^n v_{gi} v_{gj} - \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n v_{gi} \cdot \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n v_{gj}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{g=1}^n v_{gi}^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{g=1}^n v_{gi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{g=1}^n v_{gj}^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{g=1}^n v_{gj} \right)^2 \right)}}, \quad (2.7)$$

$i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$

где n - количество экспериментов; N - количество оптимизируемых факторов x_i ; M - количество результативных показателей эффективности y_j ; v_{ig} (v_{jg}) - значение i -той (j -той) переменной при n -ом эксперименте.

Приведем график, чтобы оценить влияние производственных факторов на результативный показатель y_1 .

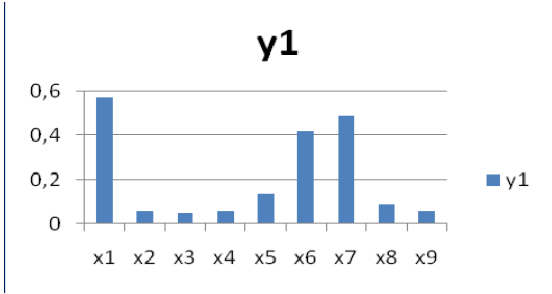


Рис. 3 - График влияния производственных показателей на y_1

По приведенному выше графику видим, что чем больше количество работников, занятых на ремонте – x_1, x_2, x_3, x_4 и чем больше количество кранов, которые на время ремонта простаивают – x_5, x_6, x_7, x_8, x_9 , тем больше y_1 – потери предприятия. Таким образом, все производственные факторы оказывают положительное влияние на результативный показатель.

По результатам анализа данных с учетом того, что связь между переменными с коэффициентом линейной корреляции не меньше 0.3 по абсолютной величине считается существенной, не меньше 0.8 по абсолютной величине близкой к линейной и не превышающей по абсолютной величине значение 0.1 незначимой сделаем следующие выводы.

Во-первых, коэффициенты линейной корреляции между результативными показателями эффективности и факторами примерно в половине случаев по абсолютной величине превышают критическое значение. Поэтому уравнения регрессии могут содержать в себе факторы в первой и второй степени, а также в виде функций от факторов.

Во-вторых, величина корреляционной связи между результативными показателями эффективности и производственно-экономическими факторами варьируется в весьма широких пределах. Абсолютная величина коэффициента линейной корреляции, меняющаяся в диапазоне от 0,01 до 0,99, показывает, что для сохранения всех переменных в уравнениях регрессии целесообразно использовать нелинейную регрессию.

8. Постановка задачи построения уравнений регрессии требует, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от вычисленных по аппроксимирующей зависимости была минимальной. Кроме того требуется, чтобы отношение стандартной ошибки к среднему значению не превышало 0,1; уровень значимости по

коэффициенту множественной детерминации, критерию Фишера для уравнения регрессии и уровни значимости по критерию Стьюдента для коэффициентов уравнения регрессии не превышало 0,05. Совокупность полученных уравнений регрессии представляет собой математическую модель процессов. В таблице 3 приведено уравнение регрессии для результативного показателя y_1

Таблица 3 – Результаты регрессионного анализа

Regression Summary for Dependent Variable: Y1 (Spreadsheet2)						
R= .92625562 R²= .85794948 Adjusted R²= .77804607 F(18,32)=10,737 p<.00000 Std. Error of estimate: 1830E4						
N=51	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(32)	p-level
Intercept			-43948615	510438021	-0,08610	0,931924
X1	1,88251	1,039630	44348305	24491658	1,81075	0,079577
X2	1,61823	2,076054	76244687	97815631	0,77947	0,441428
X3	-0,21203	1,557664	-9990240	73391101	-0,13612	0,892577
X4	-0,39994	1,557664	-18843799	73391101	-0,25676	0,799009
X5	0,87103	1,399193	1343336	2157887	0,62252	0,538009
X6	-0,13478	3,631835	-127002	3422360	-0,03711	0,970628
X7	0,21846	1,557664	205855	1467822	0,14025	0,889345
X8	0,39229	1,557664	1848308	7339110	0,25184	0,802772
X9	0,06171	1,557664	290761	7339110	0,03962	0,968644
X1*X1	-1,32254	1,048244	-3854615	3055164	-1,26167	0,216186
X2*X2	-1,55954	2,080381	-9161081	12220656	-0,74964	0,458948
X3*X3	0,26523	1,563427	2073206	12220656	0,16965	0,866355
X4*X4	0,46341	1,563427	3622285	12220656	0,29641	0,768835
X5*X5	-0,70074	1,427822	-7524	15332	-0,49077	0,626935
X6*X6	0,55167	3,634310	742	4888	0,15180	0,880301
X7*X7	0,27038	1,563427	845	4888	0,17294	0,863787
X8*X8	-0,29897	1,563427	-23369	122207	-0,19123	0,849554
X9*X9	-0,00411	1,563427	-321	122207	-0,00263	0,997920

$$y_1 = -43948615 + 44348305 \cdot x_1 + 76244687 \cdot x_2 - 9990240 \cdot x_3 - 18843799 \cdot x_4 + 1343336 \cdot x_5 - 127002 \cdot x_6 + 205855 \cdot x_7 + 1848308 \cdot x_8 + 290761 \cdot x_9 - 3854615 \cdot x_1^2 - 9161081 \cdot x_2^2 + 2073206 \cdot x_3^2 + 3622285 \cdot x_4^2 - 7524 \cdot x_5^2 + 742 \cdot x_7^2 - 23369 \cdot x_8^2 - 321 \cdot x_9^2 \quad (3)$$

Каждое уравнение характеризуется рядом основных параметров. Значения основных параметров приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения основных параметров

y_i	S_{cm}/y	R^2	F	p_F
y_1	$2,4 \cdot 10^{-10}$	0,86	10,737	0,00000
y_2	0,0072	0,678	1,66	0,11300
y_3	0,0554	0,931	8,35	0,00001
y_4	0,0251	0,981	38,53	0,00000
y_5	0,0506	0,933	11,093	0,00000
y_6	0,0801	0,878	4,83	0,0027

В таблице представлены следующие сведения об уравнениях регрессии:

R^2 – коэффициент множественной детерминации;

F – значение критерия Фишера;

p_F – уровень значимости уравнения регрессии по критерию Фишера;

S_{cm} – стандартная ошибка аппроксимации;

Таким образом, можно сделать вывод, что в результате построено 5 качественных уравнений регрессии, которые удовлетворяют всем наложенным ограничениям. Одно уравнение – y_2 не удовлетворяет поставленным требованиям только по одному показателю – критерию Фишера, поэтому

будем считать, что все уравнения являются вполне пригодными.

9. Оценка степени влияния факторов на результативные показатели эффективности процесса ремонта проведена по коэффициентам эластичности факторов [4]. На рис.4 представлена круговая диаграмма удельных весов факторов, влияющих на изменение y_1 . На рис.5 представлены результаты оценки степени влияния факторов на потери предприятия за период обслуживания кранов – y_1 по их коэффициентам эластичности.

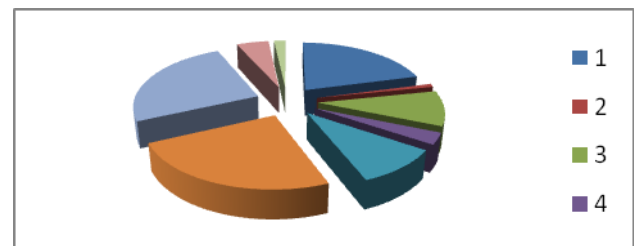


Рис. 4 - Круговая диаграмма удельных весов факторов, влияющих на изменение y_1 .

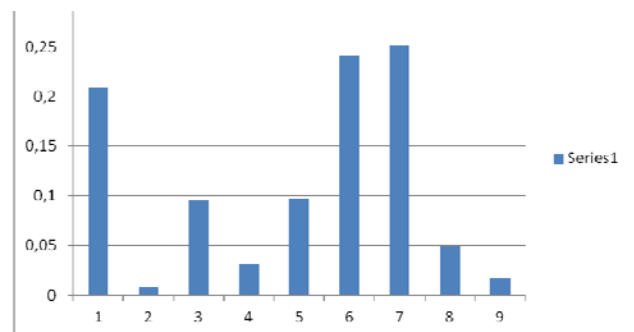


Рис. 5 - Гистограмма коэффициентов эластичности факторов, влияющих на изменение y_1

Полученная диаграмма позволяет сделать вывод, что все факторы, рассматриваемые в процессе моделирования, оказывают положительное влияние на потери предприятия. Большое влияние на потери оказывает время простоя на ремонтных работах стреловых и башенных кранов. Также значительное влияние оказывает количество рабочих, занятых на механических работах. Стоит отметить, что в нашей системе рассмотрен непосредственно процесс ремонта, однако рабочие, участвующие в данном процессе также могут быть задействованы на других видах работ, например, на профилактических работах и сокращение их количества может привести к неэффективной работе.

10. Поставим задачу оптимизации как задачу нахождения минимального значения результативного показателя эффективности y_1 - потерь специализированных организаций по ремонту за счет выбора оптимальных значений x_i , $i = \overline{1, m}$ при ограничениях на другие результативные показатели эффективности и факторы. Ограничения на показатели эффективности заданы так, что фактически не превышают лучшие результаты,

достигнутые предприятием за последнее время, и представляют собой минимальные и максимальные из ранее достигнутых значений.

Таким образом, ставится задача уменьшения количества потерь:

$$f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow \min$$

при ограничениях на переменные $x_i, i = \overline{1,4}$ и на результативные показатели $y_j, j = \overline{1,6}$:

$$2 \leq x_1 \leq 6;$$

$$3 \leq x_2 \leq 5;$$

$$2 \leq x_3 \leq 4;$$

$$2 \leq x_4 \leq 4;$$

$$304941762 \leq y_1 \leq 487069276;$$

$$8,161 \leq y_2 \leq 8,508;$$

$$0,397 \leq y_3 \leq 0,903;$$

$$0,46 \leq y_4 \leq 0,965;$$

$$0,411 \leq y_5 \leq 0,885;$$

$$0,468 \leq y_6 \leq 0,963.$$

Проведем оптимизацию как задачу нахождения минимальных значения результативного показателя y_1 за счет выбора оптимальных значений оптимизируемых факторов x_1, x_2, x_3 и x_4 при ограничениях на другие показатели эффективности и факторы для каждого из 51 варианта модели.

Для оптимизации выбран метод касательных (Ньютона), обеспечивающий нахождение максимального значения, если нелинейность целевой функции и ограничений не превышает второй степени [18].

11. По результатам оптимизации получено 4 уравнения регрессии, пригодные для вычисления оптимальных значений количества рабочих, задействованных на четырех видах работ, соответственно, в зависимости от объективных факторов.

Полученные результаты не противоречат здравому смыслу и позволяют эффективно организовать работу по ремонту кранов. Уравнения регрессии, полученные в результате оптимизации, используются для определения количества работников, которое необходимо для эффективной работы.

12. Рассмотрим три возможных сценария процесса ремонта ГПМ в зависимости от воздействия объективных факторов на систему и вычислим количество рабочих, необходимых для ремонта.

1) Рассмотрим вариант при минимальных моделируемых значениях: $x_5 = 40$ – количество обслуживаемых вышек; $x_6 = 300$ – количество обслуживаемых стреловых кранов; $x_7 = 100$ – количество обслуживаемых башенных кранов; $x_8 = 20$ – количество обслуживаемых козловых

кранов; $x_9 = 20$ – количество обслуживаемых мостовых кранов, тогда по формулам приведенным выше получим:

$$x_{1\text{опт}} = 4; x_{2\text{опт}} = 4; x_{3\text{опт}} = 5; x_{5\text{опт}} = 5;$$

$$y_1 = 496 \text{ млн. рублей.}$$

2) Рассмотрим вариант при средних моделируемых значениях: $x_5 = 75$ – количество обслуживаемых вышек; $x_6 = 350$ – количество обслуживаемых стреловых кранов; $x_7 = 150$ – количество обслуживаемых башенных кранов; $x_8 = 30$ – количество обслуживаемых козловых кранов; $x_9 = 30$ – количество обслуживаемых мостовых кранов. Получим следующие результаты:

$$y_1 = 512 \text{ млн. рублей.}$$

3) Рассмотрим вариант при максимальных моделируемых значениях: $x_5 = 100$ – количество обслуживаемых вышек; $x_6 = 400$ – количество обслуживаемых стреловых кранов; $x_7 = 200$ – количество обслуживаемых башенных кранов; $x_8 = 40$ – количество обслуживаемых козловых кранов; $x_9 = 40$ – количество обслуживаемых мостовых кранов. Получим следующие результаты:

$$y_1 = 598 \text{ млн. рублей.}$$

Выводы

После проведения экспериментов можно сделать вывод о том, что расчеты проведены корректно и полученное количество ремонтников на механических, гидравлических, электромонтажных работах, а также количество наладчиков приборов безопасности не противоречат здравому смыслу.

Предложенная в работе методика моделирования процесса ремонта ГПМ на основе регрессионных моделей позволит проводить оценку затрат на ремонт и будет являться вспомогательным инструментом.

Работа выполнена при поддержке Гранта ФЦП-Кадры № 14.B37.21.1484

Литература

1. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд. Стандартов, 1976. – 272 с.
2. Власов В.Т., Дубов А.А. Физическая теория процесса "деформация - разрушение". Часть I. Физические критерии предельных состояний металла. М.: ЗАО "Тиссо", 2007. – 517 с.
3. Мокшин В.В., Якимов И.М., Юльметьев Р.М., Мокшин А.В. Рекурсивно-регрессионная самоорганизация моделей анализа и контроля сложных систем // Нелинейный мир. М: 2009. №1. С. 48-63.
4. Мокшин В.В., Якимов И.М. Модели и методы исследования многопараметрических систем: Монография. – Казань: Изд-во МОиН РТ, 2012. – 200 с.
5. Мокшин В.В., Якимов И.М. Метод формирования модели анализа сложной системы / Информационные

- технологии, №5. – М.: Изд-во Новые технологии, 2011. – С. 46-51.
6. Аун С. Информационно-измерительная система слежения за движущимися объектами / С. Аун, Л.М. Шарнин, А.П. Кирпичников // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КНИТУ, 2011. – Т. 14. №16. – С. 224-232.
7. Маклаков С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modelling Suite М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 432с.
8. Бордяков Д.Е., Орлов А.Н. Грузоподъемные машины: Учебное пособие. – СПб, 1995.
9. Александров, М.П., Колобов Л.Н. и др. Грузоподъемные машины. – М.: Высшая школа, 1973. – 471с.
10. Якимов И.М. Компьютерное моделирование: Учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008.– 220 с.
11. Орлов А. И. Прикладная статистика. Учебник. — М.: Экзамен, 2006. – 671 с.

© **В. В. Мокшин** – канд. тех. наук, доц. каф. автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ-КАИ, vladimir.mokshin@mail.ru; **А. П. Кирпичников** – д-р физ.-мат. наук, зав. каф. интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами КНИТУ, kirpichnikov@kstu.ru; **М. А. Степанова** – асп. каф. автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ-КАИ, heart_aur@mail.ru, **С. А. Сытник** – канд. тех. наук, доцент той же кафедры, ooo.lun@gmail.com.