

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.

Обоз-начение	Наименование
y1	Потери предприятия от ремонта кранов за вычетом расходов на заработную плату работников за период обслуживания кранов
y2	Среднее время ремонта (в часах) ГПМ
y3	Стандартное отклонение времени ремонта (в часах) ГПМ
y4	Время ожидания ремонта (в часах) ГПМ
y5	Средняя длина очереди на ремонт (в часах) ГПМ
x1	Количество ремонтников на механических работах, меняется от 2 до 6
x2	Количество ремонтников на гидравлических работах, меняется от 3 до 5
x3	Количество ремонтников на электромонтажных работах, меняется от 2 до 4
x4	Количество наладчиков приборов безопасности, меняется от 2 до 4
x5	Количество обслуживаемых вышек, меняется от 40 до 100
x6	Количество обслуживаемых стреловых кранов, меняется от 300 до 400
x7	Количество обслуживаемых башенных кранов, меняется от 100 до 200
x8	Количество обслуживаемых козловых кранов, меняется от 20 до 40
x9	Количество обслуживаемых мостовых кранов, меняется от 20 до 40

2. Требуется построить математическую модель процесса в виде совокупности уравнений регрессии: (1) По математической модели (1) производится постановка оптимизационной задачи: (2) 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 : 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
y1	Потери предприятия от ремонта кранов за вычетом расходов на заработную плату работников за период обслуживания кранов, руб.;	374035009
y2	Среднее время ремонта (в часах) ГПМ;	8,34
y3	Стандартное отклонение времени ремонта (в часах) ГПМ	0,53

Коэффициенты линейной корреляции между результативными показателями и производственными факторами определяются по формуле [11]: , (2.7) где n- количество экспериментов; N- количество оптимизируемых факторов ; M- количество результативных показателей эффективности y_j ; - 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 (3) Каждое уравнение характеризуется рядом основных параметров. Значения основных параметров приведены в таблице 4. Таблица 4 – Значения основных параметров

y_i	Sct/y	R ²	F	pF
y_1	2,4·10 ⁻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 регрессий: R² – коэффициент множественной детерминации; F – значение критерия Фишера; pF – уровень значимости уравнения регрессии по критерию Фишера; Sct – 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 , $i=$ 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: при ограничениях на переменные x_i и на результативные показатели y_j : 26; 35; 24; 24; 304941762487069276; 8,1618,508; 0,3970,903; 0,460,965; 0,4110,885; 0,4680,963. 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: – количество обслуживаемых вышек; – количество обслуживаемых стреловых кранов; – количество обслуживаемых башенных кранов; – количество обслуживаемых козловых кранов; – количество обслуживаемых мостовых кранов, тогда по формулам приведенным выше получим: ; ; ; ; млн. рублей. 2) Рассмотрим вариант при средних моделируемых значениях: – количество обслуживаемых вышек; – количество обслуживаемых стреловых кранов; – количество обслуживаемых башенных кранов; – количество обслуживаемых козловых кранов; – количество обслуживаемых мостовых кранов. Получим следующие результаты: млн. рублей. 3) Рассмотрим вариант при максимальных моделируемых значениях: – количество обслуживаемых вышек; – количество обслуживаемых стреловых кранов; – количество обслуживаемых башенных кранов; – количество обслуживаемых козловых кранов; – количество обслуживаемых мостовых кранов. Получим следующие результаты: 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.