

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ И РЕМОНТНЫХ РАБОТ ПОДЪЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Алексей Викторович КУРБАКОВ, мл. научн. сотрудник
НПП «ЭГО», г. Москва

Анатолий Сергеевич СЫТНИК, канд. техн. наук,
доцент КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, директор
ООО «ЛУН-М», г. Казань

Игорь Максимович ЯКИМОВ, канд. техн. наук,
профессор

Казанский национальный исследовательский технический
университет – КАИ им. А.Н. Туполева

Предлагается технология построения статистических моделей для исследования эффективности бизнес-процессов и их оптимизации на примере профилактических работ на подъемных сооружениях. Исследование проведено с помощью пакетов прикладных программ Statistica 8.0 и Excel 2010.

Ключевые слова: бизнес-процессы, оптимизация обслуживания, математическая модель, регрессионный анализ, Statistica 8.0.

Производственный процесс проведения профилактических и ремонтных работ является типичным бизнес-процессом, под которым понимается любая систематическая деятельность. В успешности моделирования и оптимизации таких работ можно убедиться по имеющимся публикациям [1 - 3]. Цель данной работы состоит в повышении эффективности производственного процесса, достигаемого уменьшением потерь предприятий, эксплуатирующих подъемные сооружения (ПС), за счет сокращения времени их профилактического обслуживания, ремонта и повышения уровня занятости работников специализированной организации по обслуживанию ПС.

Для моделирования и оптимизации процессов проведения профилактики и ремонта ПС предлагается методика, состоящая из следующих 12 этапов.

1. Предварительный анализ предметной области. Выбор результативных показателей эффективности процессов профилактики и ремонта ПС и влияющих на них факторов.
2. Постановка задачи.
3. Разработка структурной схемы имитационной модели.
4. Разработка и отладка имитационной модели.
5. Составление стратегического плана проведения имитационных экспериментов.
6. Имитационное моделирование процессов по стратегическому плану.
7. Вычисление коэффициентов линейной корреляции и

оценка их существенности.

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

9. Оценка степени влияния факторов на результативные показатели эффективности исследуемых процессов.

10. Оптимизация процессов профилактики и ремонта.

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

12. Генерация управленческих решений на примере трех сценариев.

Специализированная организация осуществляет профилактику и ремонт пяти видов ПС: стреловых, башенных, козловых, мостовых кранов и вышек. Производственный процесс включает в себя четыре вида работ: механические, гидравлические, электрические и приборные. Гидравлические работы выполняются строго после механических, приборные после электрических. По этим двум ветвям работы можно выполнять в параллельном режиме.

Для исследования производственного процесса были отобраны 6 результативных показателей эффективности (откликов) процесса профилактики и ремонта ПС и 9 влияющих на них факторов: y_1 – стоимость потерь предприятий за счет неполученного дохода, во время проведения профилактики или ремонта ПС в рублях; y_2 – среднее время профилактики и ремонта одного ПС в часах; y_3, y_4, y_5, y_6 – коэффициенты занятости работников на механических, гидравлических, электромонтажных и приборных работах; x_1, x_2, x_3, x_4 – количество рабочих по профилактике и ремонту механики, гидравлики, электромонтажа и приборов; x_5, x_6, x_7, x_8, x_9 – количество обслуживаемых вышек, стреловых, башенных, козловых и мостовых кранов.

Первые четыре фактора можно менять для обеспечения требуемых значений откликов – это оптимизируемые факторы. Остальные факторы внешней среды меняются независимо от наших желаний – объективные факторы. Важное значение в оценке эффективности производственного процесса имеет производительность труда, измеряемая показателем y_2 .

Структурная модель процессов проведения профилактических и ремонтных работ, построенная с помощью системы BPwin, в виде диаграммы IDEF3 приведена на рис. 1.

Первоначально принято допущение, что между результативными показателями эффективности производственного процесса и влияющими на них факторами существует нели-

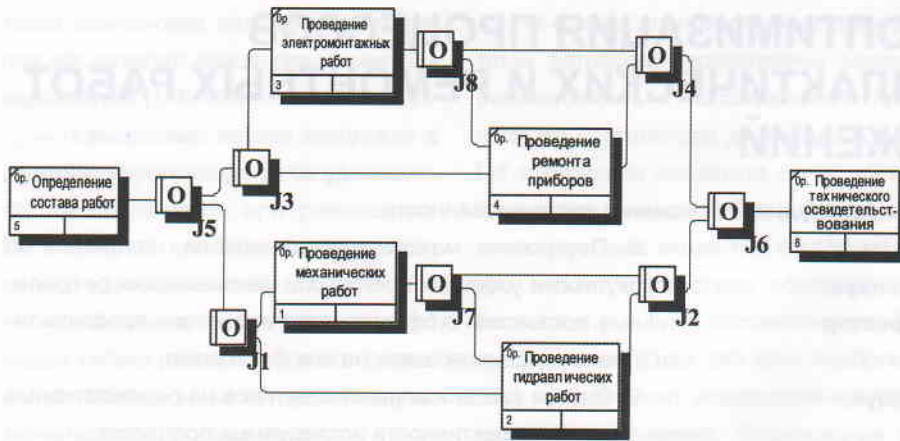


Рис. 1. Структурная модель процессов проведения профилактических и ремонтных работ

нейная зависимость второго порядка. Для ее отображения применён план дробного факторного эксперимента (ДФЭ), в котором 5 факторов приняты в качестве основных, по которым составлен план полного факторного эксперимента, и 4 фактора приняты в качестве дополнительных – они меняются по законам изменения произведений основных факторов. К плану ДФЭ добавляются центральная точка и 18 звёздных точек, по две на каждый фактор. Таким образом общее количество вариантов моделирования составило $N = 1 + 2^5 + 2 \cdot 9 = 51$.

Имитационная модель производственного процесса обслуживания ПС разработана на языке GPSS W [4]. Программная модель состоит из 9 сегментов, имитирующих поступление на обслуживание 5 видов ПС и 4 выполняемых видов производственных операций. Она состоит из 280 операторов языка GPSS W. Результаты моделирования по стратегическому плану представляются в табличном виде, пригодном для их дальнейшей обработки.

Коэффициенты линейной корреляции вычисляются по N вариантам стратегического плана по следующей формуле [5]:

$$r_{xy} = \frac{m_{1xy}^* - m_{1x}^* \cdot m_{1y}^*}{\sigma_x^* \cdot \sigma_y^*} \quad (1)$$

В формуле (1) в числителе записаны оценки математических ожиданий переменных x , y и их произведений, в знаменателе – оценки стандартных отклонений переменных x и y . Оценить существенность коэффициентов линейной корреляции между результативными показателями эффективности профилактики и ремонта ПС и влияющими на них факторами можно по критическому значению коэффициента линейной корреляции.

$$r_{крит} = \pm \sqrt{\frac{t_{крит}^2}{t_{крит}^2 + N - 2}} = \pm \sqrt{\frac{2,0096^2}{2,0096^2 + 51 - 2}} = \pm 0,275. \quad (2)$$

По формуле (1) вычислены коэффициенты линейной корреляции между результативными показателями эффективности производственного процесса и влияющими на них факторами. При критическом значении коэффициентов линейной корреляции и выше его по абсолютной величине связь между переменными можно считать существенной.

Это значение вычислено по формуле (2) для количества вариантов $N = 51$, доверительной вероятности $\beta = 0,95$ и критерия Стьюдента $t_{крит} = 2,0096$, найденного по статистической таблице [5]. Факторы, коэффициенты линейной корреляции которых с результативными показателями эффективности превышают критическое значение, отобраны для включения в уравнения регрессии.

По результатам имитационного моделирования разработана математическая модель процессов проведения профилактических и ремонтных работ, состоящая из совокупности уравнений регрессии.

$$y_j = f_j(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9); \quad j = \overline{1, 6}. \quad (3)$$

При построении уравнений регрессии необходимо, 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 0,05; уровень значимости по коэффициенту множественной детерминации и критерию Фишера для уравнений регрессии и уровни значимости по критерию Стьюдента для коэффициентов уравнений регрессии не превышали 0,05. Уравнения регрессии получены с помощью процедуры пошаговой регрессии ППП Statistica 6.0 [6]. Приведём два наиболее существенных уравнения регрессии.

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 289660558 - 17147310x_1 + 53942136x_2 - 5565878x_3 - 11318427x_4 + \\
 & - 1355138x_5 - 666188x_6 - 422967x_7 + 65918x_8 + 117426x_9 + 109852x_{10} + \\
 & \cdot 29011x_{11}x_5 + 61783x_2x_6 + 35462x_2x_7 + 19635x_3x_5 + 132x_3x_6 - 25755x_3x_7 - \\
 & \cdot 53622x_4x_5 - 28700x_4x_6 + 54746x_4x_7 - 3936711x_1^2 - 9489465x_2^2 + \\
 & \cdot 1744822x_3^2 + 3293901x_4^2 - 7935x_5^2 + 611x_6^2 + 714x_7^2 \\
 y_2 = & 7.212462 - 0.138245x_1 + 0.14153x_2 + 0.181184x_3 + 0.504636x_4 - \\
 & - 0.000949x_5 - 0.00208x_6 + 0.001388x_7 + 0.019956x_8 + 0.000290x_9 + \\
 & + 0.000092x_{10} + 0.000126x_{11} - 0.0005x_{12}x_8 + 0.001117x_{13}x_9 + 0.000249x_{14}x_{10} - \\
 & - 0.000088x_{15}x_{11} - 0.002316x_{16}x_{12} - 0.000173x_{17}x_{13} + 0.000042x_{18}x_{14} + 0.000247x_{19}x_{15} - \\
 & - 0.000347x_{20}x_{16} - 0.000084x_{21}x_{17} - 0.004684x_{22}x_{18} + 0.008975x_{23}^2 - 0.0176x_{24}^2 - \\
 & - 0.0226x_{25}^2 - 0.0376x_{26}^2 + 0.000003x_{27}^2 - 0.000001x_{28}^2
 \end{aligned} \quad (4)$$

При построении математической модели все поставленные требования к шести полученным уравнениям регрессии выполнены. На рис. 2 приведена диаграмма коэффициентов эластичности факторов в уравнении регрессии для результативного показателя y_2 . Среднее время обслуживания ПС уменьшается при увеличении количества рабочих (факторы $x_1 - x_4$) и увеличивается при увеличении количества обслуживаемых ПС (факторы $x_5 - x_9$).

Оптимизация выполняется как задача нахождения минимальных значений результативного показателя y_1 – потерь предприятий, эксплуатирующих ПС за время проведения профилактических и ремонтных работ, путем выбора оптимальных значений факторов $x_i, i = \overline{1, 4}$ при ограничениях на



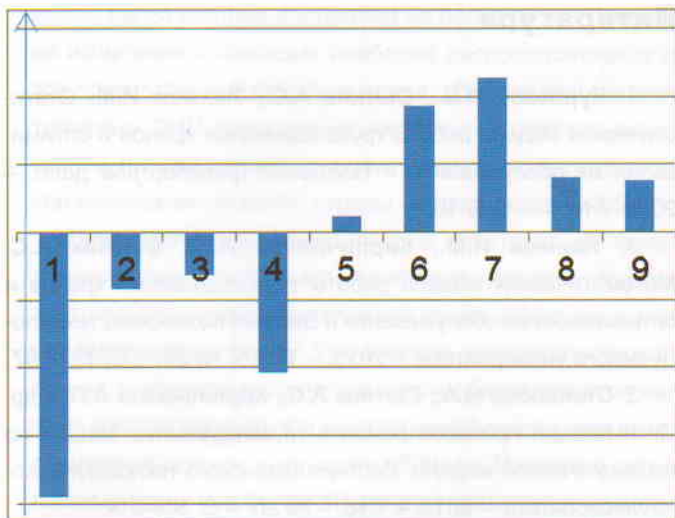


Рис. 2. Диаграмма коэффициентов эластичности

другие показатели эффективности и факторы для каждого из 51 варианта модели. Ограничения на показатели эффективности представляют собой минимальные и максимальные из ранее достигнутых значений. Таким образом, ставится задача уменьшения потерь:

$$f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow \min \quad (5)$$

при ограничениях на оптимизируемые факторы $x_i, i = \overline{1, 4}$ и на результативные показатели $y_j, j = \overline{1, 6}$: $2 \leq x_1 \leq 6$; $3 \leq x_2 \leq 5$; $2 \leq x_3 \leq 4$; $2 \leq x_4 \leq 4$; $304941762 \leq y_1 \leq 487069276$; $8,161 \leq y_2 \leq 8,508$; $0,397 \leq y_3 \leq 0,903$; $0,46 \leq y_4 \leq 0,965$; $0,411 \leq y_5 \leq 0,885$; $0,468 \leq y_6 \leq 0,963$.

Для оптимизации выбран метод касательных, обеспечивающий нахождение минимального значения, если нелинейность целевой функции и ограничений не превышает второй степени, и использована имеющаяся в ППП Excel 2010, соответствующая процедура оптимизации. Получены оптимальные значения факторов.

По результатам оптимизации (5) выводятся расчётные формулы для вычисления оптимальных значений факторов x_1, x_2, x_3, x_4 :

$$x_i = F_i(x_5, \dots, x_9); \quad i = \overline{1, 4} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} x_{1,опт} &= 1.062047 + 0.020373x_5 + 0.008284x_6 + 0.004222x_7 + 0.044641x_8 + 0.044641x_9 - \\ &- 0.000118x_5^2 - 0.000022x_6^2 - 0.000022x_7^2 - 0.000548x_8^2 - 0.000548x_9^2 \\ x_{2,опт} &= 5,058018 - 0,002397x_5 - 0,003836x_6 - 0,001644x_7 - 0,008219x_8 - 0,008219x_9 + \\ &+ 0,000017x_5^2 + 0,000005x_6^2 + 0,000005x_7^2 + 0,000137x_8^2 + 0,000137x_9^2 \quad (7) \\ x_{3,опт} &= -6,75907 + 0,05992x_5 + 0,02685x_6 + 0,01151x_7 + 0,05753x_8 - 0,05753x_9 - \\ &- 0,000032x_5^2 - 0,000004x_6^2 - 0,000004x_7^2 - 0,000096x_8^2 - 0,000096x_9^2 \\ x_{4,опт} &= -1.82716 + 0.04102x_5 + 0.01303x_6 - 0.00029x_7 + 0.02191x_8 + 0.02278x_9 - \\ &- 0.00002x_5^2 - 0.000001x_6^2 - 0.000001x_7^2 - 0.000037x_8^2 - 0.000037x_9^2 \end{aligned}$$

На рис. 3 приведена гистограмма коэффициентов эластичности объективных факторов, влияющих на оптималь-

ное количество рабочих на механических работах – x_1 . По ней можно сделать вывод, что все пять объективных факторов – x_5, x_6, x_7, x_8, x_9 оказывают положительное влияние на количество рабочих, занятых на механических работах, т.е. чем больше обслуживаемых ПС, тем больше требуется обслуживающих их рабочих. Полученные результаты не противоречат здравому смыслу. Они позволяют организовать эффективную работу по профилактике и ремонту ПС. Уравнения регрессии (7), полученные по результатам оптимизации, можно использовать для определения количества рабочих, которое необходимо для организации эффективной работы.

Рассмотрим три возможных сценария воздействия объективных факторов на производственный процесс и вычислим количество рабочих, необходимых для профилактики и ремонта, а также возможные потери предприятий, эксплуатирующих ПС, при реализации данных сценариев и производительность специализированных организаций, оцениваемую средним временем проведения профилактических и ремонтных работ.

1. Вариант при минимальных значениях обслуживаемых ПС – вышек, стреловых, башенных, козловых и мостовых кранов: $x_5 = 40$; $x_6 = 300$; $x_7 = 100$; $x_8 = 20$; $x_9 = 20$, тогда по формулам (7) получим: $x_{1,опт} = 4$; $x_{2,опт} = 4$; $x_{3,опт} = 5$; $x_{4,опт} = 5$. По формулам (4) вычислим два наиболее существенных результативных показателя: потери предприятий, эксплуатирующих ПС, – $y_1 = 496644836$ руб. и производительность специализированной организации по профилактике и ремонту ПС – $y_2 = 8,338$ ч.

2. Вариант при средних моделируемых значениях: $x_5 = 70$; $x_6 = 350$; $x_7 = 150$; $x_8 = 30$; $x_9 = 30$, тогда по формулам (7) получим: $x_{1,опт} = 4$; $x_{2,опт} = 6$; $x_{3,опт} = 6$; $x_{4,опт} = 5$. По формулам (4) вычислим $y_1 = 512051865$ руб. и $y_2 = 7,965$ ч.

3. Вариант при максимальных моделируемых значениях: $x_5 = 100$; $x_6 = 400$; $x_7 = 200$; $x_8 = 40$; $x_9 = 40$, тогда по формулам (7) получим: $x_{1,опт} = 6$; $x_{2,опт} = 8$; $x_{3,опт} = 8$;

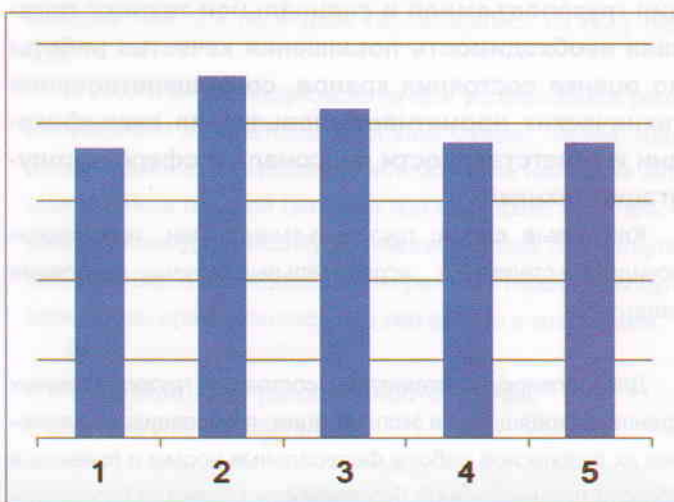


Рис. 3. Гистограмма коэффициентов эластичности

$x_{4опт} = 6$. По формулам (4) вычислим $y_1 = 598504888$ руб. и $y_2 = 7,225$ ч.

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что расчеты проведены корректно, и определенная с их помощью потребная численность рабочих на механических, гидравлических, электромонтажных работах, а также наладчиков приборов безопасности не противоречат здравому смыслу. При увеличении количества обслуживаемых ПС производительность специализированной организации по профилактическому обслуживанию и ремонту ПС удалось даже повысить за счёт целенаправленного увеличения количества рабочих на операциях производственного процесса.

В заключение следует отметить, что в данной работе отражены результаты моделирования процесса профилактики и ремонта ПС. По результатам моделирования выполнен регрессионный анализ, в ходе которого построена математическая модель процесса (4). По коэффициентам эластичности, полученным по математической модели, была проведена оценка степени влияния факторов на резуль- тивные показатели.

В результате оптимизации по математической модели получены формулы для вычисления оптимальных значений количества рабочих по операциям производственного процесса (7). Проведённые расчёты по трём сценариям демонстрируют практическую ценность проведённой работы.

Литература

1. Курбаков А.В., Сытник А.С., Якимов И.М. Статистическая модель работы грузоподъемных кранов и оптимизация их обслуживания // Подъемно-транспортное дело. – 2013. – № 4. – С. 6-10.
 2. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Сытник А.С. Математическая модель работы грузоподъемных кранов и оптимизация их обслуживания // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16. – № 24. – С. 182-187.
 3. Степанова М.А., Сытник А.С., Кирпичников А.П. и др. Оптимизация процесса ремонта грузоподъемных машин по математической модели. Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16. – № 20. – С. 309-314.
 4. Руководство пользователя по GPSS World. – Казань: изд-во «Мастер Лайн», 2002, – 384 с.
 5. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики. – М: Финансы и статистика, 1998. – 480 с.
 6. Боровиков В.П., Боровиков И.П. Statistica: Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. – М.: Информационно-издательский дом «Филин», 1998. – 608 с.
- ▲
А.С. Сытник, И.М. Якимов. Тел. (phone) 843-237-71-51; e-mail: ooo.lun@gmail.com

НЕКОТОРЫЕ ВАЖНЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУЗОПОДЪЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Анатолий Иванович ЛАГУНОВ, директор
ЗАО «Сервис-Кран», г. Нижневартовск

На конкретных примерах из практики эксплуатации грузоподъемной и специальной техники показана необходимость повышения качества работы по оценке состояния кранов, совершенствования технических нормативов, повышения квалификации и ответственности персонала в сфере эксплуатации техники.

Ключевые слова: грузоподъемный кран, техническое освидетельствование, испытательные грузы, крепление канатов.

Для проверки соответствия состояния грузоподъемных кранов, находящихся в эксплуатации, требованию обеспечения их безопасной работы Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых исполь-

зуются подъемные сооружения» (далее – ФНП), как и действовавшие прежде «Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов», предусматривают их полное техническое освидетельствование. В соответствии с п. 169 ФНП оно должно проводиться не реже одного раза в 3 года и, согласно п. 173 ФНП, включает статические и динамические испытания кранов. Для кранов всех типов статические испытания проводят при нагрузках 125% по отношению к их номинальной паспортной грузоподъемности (п. 175 ФНП). Динамические испытания, имеющие целью проверку действия крановых механизмов и тормозов, в соответствии с п. 183 упомянутых ФНП проводят грузом, масса которого превышает паспортную грузоподъемность на 10%.

Выпускавшиеся раньше автокраны с решетчатыми стрелами, имея большие значения минимального вылета, могли поднять любой по размеру и форме испытательный груз. Так, кран КС-4562 грузоподъемностью 20,0 т имел минимальный вылет стрелы 4,0 м. Современные автокраны грузоподъемностью 25,0 т на вылете 4,0 м способны поднимать