

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.531

ВЫБОР СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДРАГЛАЙНА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ РИСКОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Б. Р. Саху, С. К. Пали

*Индийский технологический институт,
E-mail: skpalei.min@iitbhu.ac.in, 221005, г. Варанаси, Индия*

Предложен подход для выбора оптимальной стратегии обслуживания горного оборудования, основанный на оценке рисков. С его помощью определены три узла драглайна с высоким уровнем риска: редуктор, подшипниковый узел и приводной вал-шестерня. Методом анализа иерархий для оптимальной стратегии обслуживания найдены четыре критерия, восемь подкритериев и четыре альтернативные стратегии обслуживания. Рассчитаны локальные и глобальные приоритеты. Выявлено, что оптимальная стратегия обслуживания для редуктора и приводного вала-шестерни — превентивное обслуживание, для подшипникового узла — периодическое. Внедрение стратегий позволяет снизить затраты на обслуживание и время простоя драглайна.

Обслуживание, оценка рисков, метод анализа иерархий, добыча угля, драглайн

DOI: 10.15372/FTPRPI20200412

Внедрение подходящей стратегии технического обслуживания оборудования необходимо для достижения надежности и высокого коэффициента технической готовности. Выбор стратегии обслуживания включает множество критериев, некоторые из них невозможно количественно оценить. Оптимальная стратегия обслуживания землеройной тяжелой техники обеспечивает эксплуатационную стабильность и общий экономический рост предприятия.

Согласно [1], третья часть всех затрат на обслуживание приходится на ненужные или неподходящие действия. Неэффективная стратегия обслуживания оборудования — причина производственных потерь, которые достигают 10% при добыче угля в Австралии [2]. Затраты на обслуживание техники составляют 20–30% от общих эксплуатационных затрат на руднике [2]. По оценке работы крупной золоторудной шахты, в рамках ежегодной дисконтированной стоимости обслуживания (10%) можно экономить более 2 млн долл. и 16% (21 млн долл.) за счет снижения общих затрат на обслуживание техники в течение 10 лет функционирования шахты [3].

Горная промышленность — основа роста экономики многих стран. В 2014–2015 гг. добыча полезных ископаемых подземным и открытым способом составила 2,4% ВВП Индии [4]. Экономические потери в результате некорректной стратегии обслуживания горного оборудо-

вания негативно влияют на экономику страны. В настоящее время угледобывающая промышленность столкнулась с конкуренцией внутри Индии и за ее пределами из-за повышенного уровня потребления угля в разных отраслях [5, 6], который заставляет угледобывающие предприятия использовать технически сложную, капиталоемкую и высокопроизводительную землеройную технику на угольных разрезах.

По данным 2016–2017 гг., 93 % угольной добычи Индии приходится на открытые выработки [5]. Чтобы сохранить позиции на таком высококонкурентном рынке, необходимо обеспечить высокую производительность при наименьших эксплуатационных затратах. Неэффективная система технического обслуживания уменьшает время эксплуатации оборудования и приводит к большим капитальным затратам.

Экскаватор-драглайн — тяжелая землеройная машина весом более 4 тыс. т (без внешнего оборудования), требующая капитальных затрат до 200 млн долл. [7]. Он используется для выемки вскрышных пород — неотъемлемого процесса при добыче полезных ископаемых открытым способом. Эффективность выемки вскрышных пород влияет на общие эксплуатационные затраты и продуктивность добычи в целом. Драглайн — сложная система из множества узлов, высокая функциональная зависимость которых позволяет корректно выполнять подъем и подтягивание ковша, поворот и перемещение. Отказ небольшого участка каната приводит к остановке всех работ и простоя техники, сопровождающемуся экономическими потерями. Необходимо исследовать отказы узлов и выбирать для них оптимальную стратегию обслуживания.

В [8] выполнены работы по изучению, обслуживанию и анализу надежности драглайна, с помощью которых в 2010 г. проведена оценка интервала обслуживания, обеспечивающего требуемый уровень надежности системы. В [7] дана оценка оптимального интервала превентивной замены деталей драглайна с использованием модели замены деталей по сроку службы. Предложен метод оценки оптимального интервала контроля, основанный на алгоритме подсчета ресурса машины [2].

С увеличением интервала контроля общие затраты на эксплуатацию драглайна можно минимизировать. В большинстве работ не предлагается отчетливая стратегия обслуживания драглайнов, т. е. инструкция по обслуживанию узлов, так как каждый узел обладает разным значением вероятности безотказной работы, имеет свою функцию распределения и вероятность отказов. Чтобы обеспечить надежность и высокий коэффициент технической готовности, избежать ненужных финансовых вложений, для каждого узла необходимо выбрать соответствующую стратегию обслуживания. Продолжающийся рост сложности горных предприятий, повышение уровня автоматизации и система строго планируемого производства предполагают изменение в стратегии обслуживания оборудования от аварийного ремонта к более комплексным стратегиям: по текущему состоянию, с ориентацией на безотказность, а также на основе оценки рисков [9]. Последний тип стратегии возник в 90-х годах XX в. и предполагает новый способ качественного управления целостностью путем учета риска [10]. Данный вид обслуживания заключается в установке приоритета технических воздействий на узлы и определении степени повышения надежности отдельных узлов для достижения требуемого уровня прочности системы [11]. Основная задача обслуживания на основе оценки рисков — сокращение совокупного риска путем частого и тщательного контроля и обслуживания узлов с высоким уровнем риска [12]. После выявления таких узлов можно выбрать для них стратегию обслуживания с помощью метода анализа иерархий.

Выбор стратегии технического обслуживания зависит от многих факторов: безопасности, затрат, среднего времени между отказами и ремонтами, а также риска. Необходимо учитывать и влияние критериев на комплексность проблемы. Метод принятия многокритериальных решений позволяет определить оптимальную стратегию обслуживания с учетом критериев, подкритериев и альтернативных вариантов.

К настоящему времени разработано несколько методов принятия многокритериальных решений: модель взвешенной суммы, модель взвешенного продукта, метод упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением и метод анализа иерархий [13]. Последний более предпочтителен, так как помогает измерить согласованность суждений лица, принимающего решение, организовать критические аспекты проблемы в иерархическую структуру и рассчитать весовые значения критериев и приоритетов альтернативных вариантов с помощью матрицы сравнения [14]. Многие исследователи применяли метод анализа иерархий для выбора стратегии обслуживания оборудования на химических и нефтеперерабатывающих заводах с учетом различных подкритериев и альтернатив [12, 15–17]. Но и для капиталоемкого драглайна такой метод позволяет получить более полезную информацию при выборе стратегии обслуживания. Для достижения этой цели в настоящей работе предлагается применять сочетание обслуживания на основе оценки рисков с методом анализа иерархий. Для выявления узлов с высоким уровнем риска драглайн разделен на 43 отдельных узла, которые влияют на работоспособность драглайна. Затем выполнена оценка риска данных узлов и определены узлы с высоким уровнем риска. После этого сделана попытка установить оптимальную стратегию обслуживания узлов драглайна с высоким уровнем риска с учетом четырех критериев, восьми подкритериев и четырех альтернативных стратегий.

МЕТОДОЛОГИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ РИСКОВ

Методология выбора стратегии обслуживания драглайна представлена исходя из методологии обслуживания на основе оценки рисков с применением метода анализа иерархий. На рис. 1 показан подход к обслуживанию, основанный на оценке рисков [12, 18]. Стратегия такого обслуживания — количественный метод, сочетающий анализ надежности и оценку риска для осуществления экономически выгодной стратегии обслуживания узлов с высоким уровнем риска. Обслуживание на основе оценки рисков состоит из оценки риска и выбора стратегии обслуживания.

Оценка риска состоит из четырех этапов: анализа данных по отказам, вычисления частоты и последствий, расчета степени риска, сравнительной оценки риска. Отказ происходит, когда оборудование выходит из строя и не может выполнять требуемые функции при некоторых внешних условиях. При анализе данных по отказам обрабатывается первичная статистика отказов оборудования, помогающая выявить узлы, из-за которых произошел отказ системы или оборудования, и рассчитать время до отказа и среднее время простоя для каждого случая. Вычисляется частота отказов каждого узла, анализируются последствия отказа узлов исходя из безопасности персонала, экологической угрозы и экономических потерь. Задача анализа последствий заключается в количественном определении потенциальных последствий отказа. Оценивается степень риска отказа каждого узла — произведение частоты отказа и его последствий.

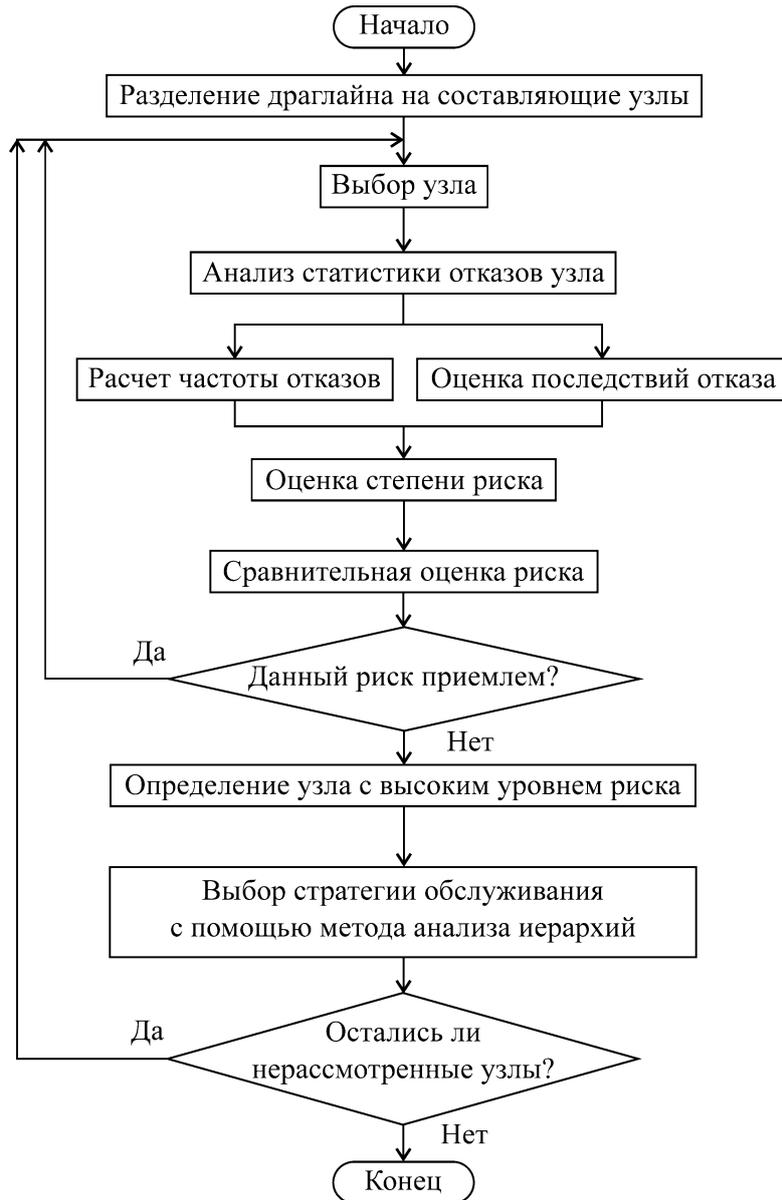


Рис. 1. Предлагаемый подход к техническому обслуживанию драглайна на основе оценки риска

Цель сравнительной оценки риска — решение о принятии риска. Необходимо сравнить степени риска случая отказа узла с критерием или значением принятия риска. Критерий принятия риска определяет, насколько данный риск можно принять в конкретный период времени [19]. Если рассчитанная степень риска выше значения принятия, то данный риск необходимо снизить за счет эффективного планирования обслуживания.

Узлы с неприемлемо высоким риском устанавливаются в ходе сравнительной оценки риска. Три узла драглайна определены как узлы с высоким уровнем риска. Выбор подходящей стратегии обслуживания данных узлов осуществляется с помощью метода анализа иерархий из-за простоты использования и высокой гибкости [20]. Его основное преимущество — возможность учета субъективных мнений лиц, принимающих решения. На рис. 2 показан алгоритм выбора стратегии обслуживания с помощью метода анализа иерархий.



Рис. 2. Алгоритм выбора подходящей стратегии обслуживания с помощью метода анализа иерархий

Разработка иерархической структуры для выбора стратегии обслуживания. Цель разработки иерархической структуры — определение влияния элемента низкого уровня на высокий. Сначала необходимо установить первичную цель разработки иерархической структуры, а затем выявить критерии ее достижения и выбрать подкритерии в случае их наличия. В последнюю очередь выбираются альтернативные варианты. Данная структура позволяет оценить влияние каждого альтернативного варианта на общую цель иерархии. Не рекомендуется превышать число критериев и альтернативных вариантов более 7, чтобы соблюсти согласованность и избежать излишних расчетов при проверке [21]. Разработана четырехуровневая иерархическая модель, с помощью которой можно выбрать наиболее подходящую стратегию обслуживания драглайна (рис. 3). Верхний уровень соответствует цели данной работы, второй отражает критерии: затраты, преимущества, актуальность и риск, на третьем находятся подкритерии, а на четвертом — альтернативные варианты.



Рис. 3. Иерархическая структура выбора стратегии технического обслуживания

Критерии и подкритерии. Выбрано четыре критерия, каждый из которых имеет подкритерии:

- а) затраты на оборудование и обучение персонала;
- б) актуальность применения: выявление дефектов, способность к восстановлению;
- в) преимущества: безопасность рабочих, оптимизация хранения запасных частей;
- г) риск: частота отказов, последствия.

Альтернативные варианты. Постоянное развитие технического обслуживания за последние десятилетия установило четыре основные стратегии, которые используют инженеры по эксплуатации:

а) внеплановое обслуживание, которое может быть описано “пожарным” подходом. Оборудование работает непосредственно до отказа. Отказавшее оборудование или узел ремонтируются или заменяются;

б) превентивное обслуживание: совокупность технических воздействий по запланированному мониторингу, настройке и регулировке, ремонту и замене необходимых узлов оборудования. Одна из ключевых целей данной стратегии — выявление дефекта, который может привести к отказу машины;

в) предупредительное обслуживание. Применяются диагностические инструменты для измерения физических параметров оборудования: температуры, вибрации, шума, состояния смазки и наличия коррозии. Когда один из параметров достигает заданного уровня, проводят техническое обслуживание оборудования, чтобы восстановить его в требуемое состояние;

г) периодическое или плановое обслуживание, имеющее фиксированную стоимость и технические действия, которые осуществляют в соответствии с рекомендациями производителя. Регулярно выполняются технические воздействия, соответствующие заранее установленному расписанию по обслуживанию эксплуатационного состояния оборудования, машины, завода или системы.

Выполнение парного сравнения и разработка матрицы суждений. Сравняются элементы на конкретном уровне в соответствии с определенным элементом на ближайшем верхнем уровне. Полученные веса называются локальными весовыми значениями. Для сравнения элементов происходит сбор мнений лица, принимающего решение. Элементы попарно сравниваются, и суждения фиксируются в рейтинговой шкале [22] (табл. 1). Элемент, находящийся выше в рейтинге по сравнению с другим, называется превосходящим. Далее составляется матрица суждений:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix},$$

где n — число сравниваемых элементов; a_{ij} — значимость i -го элемента в соответствии с j -м элементом при условии, что $a_{ii} > 0$, $a_{ij} = 1/a_{ji}$ и $a_{ii} = 1$.

ТАБЛИЦА 1. Шкала парного сравнения

Интенсивность значимости	Определение	Объяснение
1	Одинаковая значимость обоих элементов	Два элемента оказывают равное воздействие на систему
3	Значимость одного элемента немного превышает значимость другого	Опыт и суждения показывают, что один элемент оказывает несколько большее влияние на систему, чем другой
5	Значимость одного элемента превышает значимость другого	Опыт и суждения показывают, что один элемент оказывает большее влияние на систему, чем другой
7	Значимость одного элемента намного превышает значимость другого	Вклад одного элемента в работу системы намного больше другого, что видно на практике
9	Крайнее превышение значимости одного элемента по сравнению с другим	Вклад одного элемента превышает вклад другого максимально возможным образом
2, 4, 6, 8	Средние значения	Применяются, когда необходимо выбрать компромиссное значение

Расчет локальных и глобальных весовых значений. Матрица сравнения показывает значимость факторов относительно друг друга в соответствии с данным алгоритмом. Локальные и глобальные весовые значения элементов рассчитываются методом собственных чисел [23]. Существует множество способов выразить вектор приоритета из матрицы a_{ij} , но для согласованности рекомендуется использовать метод собственных чисел [24]. Нормализованный собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению λ_{\max} в матрице сравнения, определяет локальные весовые значения соответствующих элементов в матрице W :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix},$$

где w_1, w_2, \dots, w_n — локальные весовые значения соответствующих элементов.

Оценка согласованности матрицы сравнения. Метод анализа иерархий обеспечивает измерение согласованности принимаемого решения, так как от этого зависит достоверность результатов. Отношение согласованности определяет согласованность суждений лица, принимающего решение. Принято, что значение 0.1 или меньше означает хорошее измерение согласованности. Суждение может быть случайным и, если значение согласованности превышает 0.1, должно быть пересмотрено [24]. Отношение согласованности рассчитывается как $CI = CI / RI$. Здесь $CI = (\lambda_{\max} - 1) / n - 1$ — индекс согласованности; λ_{\max} — наибольшее собственное число; n — размер матрицы сравнения; RI — индекс случайности:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Расчет глобальных приоритетов. После определения локальных весовых значений элементов на различных уровнях модели метода анализа иерархий необходимо рассчитать глобальные приоритеты альтернативных вариантов. Если структура метода анализа иерархий соответствует показанной структуре на рис. 3, тогда глобальный приоритет оценивается как

$$A_i = \sum_{j=1}^m C_j \left[\sum_{k=1}^p (S_{jk} W_{ki}) \right], \quad (1)$$

где A_i — глобальный приоритет i -го альтернативного варианта ($i = 1, 2, \dots, n$); C_j — локальное весовое значение j -го критерия под целью ($j = 1, 2, \dots, m$); S_{jk} — локальное весовое значение k -го подкритерий под j -м критерием ($k = 1, 2, \dots, p$).

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Драглайн, который на данный момент функционирует на угольном месторождении на севере Индии, выбран для демонстрации применения обслуживания на основе оценки рисков совместно с методом анализа иерархий. Технические характеристики драглайна Rapier W200: объем ковша 24 м³; длина стрелы 96 м; рабочий радиус 81 м; глубина копания 67.5 м; высота разгрузки 48.1 м. Драглайн осуществляет вскрышные работы с помощью подъема, подтягивания, поворота и опустошения ковша (рис. 4).

С главного участка угольного месторождения собраны исходные данные за 2008 – 2016 гг. по времени отказа, обслуживанию и наработке. После сбора данных осуществляется обслуживание на основе оценки рисков и применяется метод анализа иерархий для выбора наиболее эффективной стратегии обслуживания.

Техническое обслуживание драглайна, основанное на оценке риска. Первый этап обслуживания на основе оценки рисков заключается в разделении системы драглайна на составляющие элементы (узлы). Это позволит получить полную информацию о всей системе, характеристиках каждого узла и влиянии на общую работу драглайна. Драглайн разделен на 43 отдельных узла, которые могут привести к отказу (табл. 2).

Анализ статистики отказов позволил получить время и частоту отказов и средний простой узлов за восьмилетний период. В табл. 2 представлены детали анализа данных по отказам. Следующий этап — оценка степени риска, которая проводится для выявления узлов с высоким уровнем риска на основании частоты и последствий отказа.

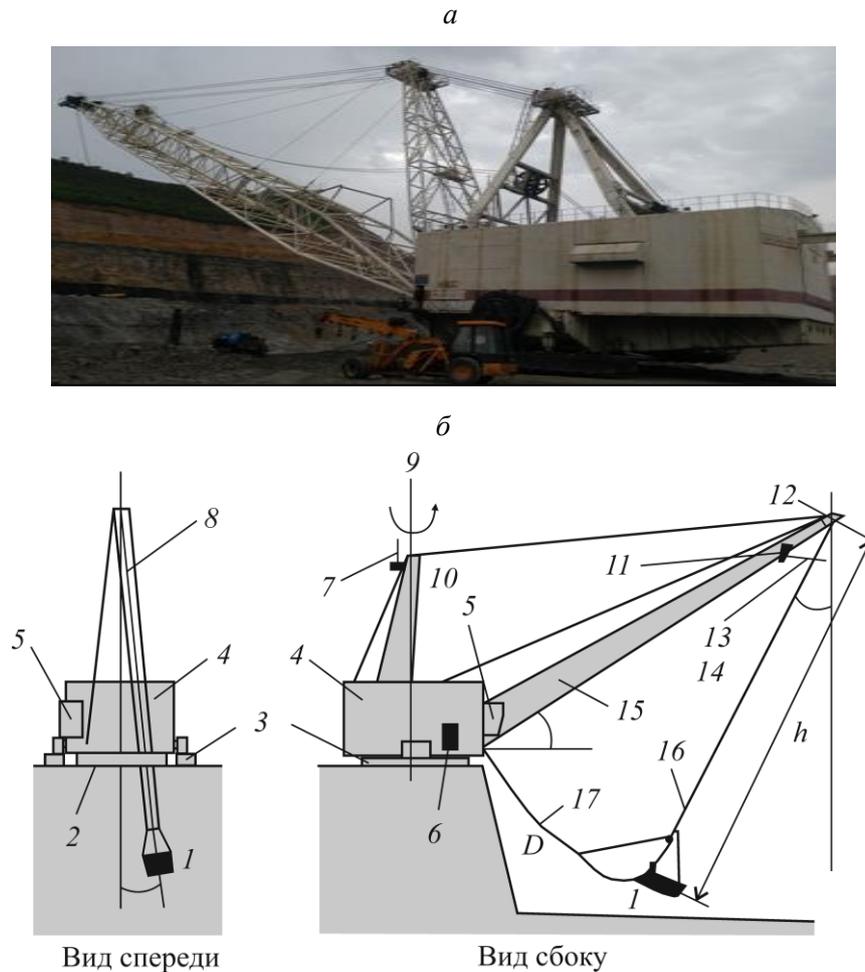


Рис. 4. Экскаватор-драглайн (*a*) и его схематичное изображение (*б*): 1 — ковш; 2 — опорная база; 3 — лыжи; 4 — кузов; 5 — кабина оператора; 6 — электронный блок управления; 7 — радиантенна; 8 — плоскость каната; 9 — ось поворота; 10 — мачта; 11 — блок измерения параметров каната; 12 — направляющий блок; 13 — лазерный сканер; 14 — плоскость сканирования; 15 — стрела; 16 — подвесной канат; 17 — тяговый канат; D — длина тягового каната; h — длина подвесного каната

Чтобы установить среднюю частоту отказов за год, недостаточно разделить общее число отказов на 8, так как отказ — случайное событие. Количество отказов за год может меняться: для электродвигателя вентилятора за 8 лет оно составило 23. Нельзя принять частоту отказов за год равной 3 ($23/8 \approx 3$), так как за первый год частота может равняться 6, за второй — 0, за третий — 4 и т. д. Для определения частоты отказов за год рассмотрена интенсивность отказов.

С помощью программного обеспечения EasyFit на основе времени отказов построены графики различных функций распределения для каждого узла. Интенсивность отказов каждого узла оценена с помощью экспоненциального распределения. Узлы с частотой меньше 5 не учитывались при построении кривой: принято, что интенсивность их отказов мала ввиду низкой частоты отказов, что оказывает минимальное влияние и не требует дальнейшей обработки из-за низкого среднего значения простоя (табл. 2). Частота отказов за год определяется как $\beta = \lambda t$ (λ — интенсивность отказов, ч^{-1} , t — общее время работы драглайна за год, ч; $\beta = 330 \text{ ч}^{-1} \cdot 16 \text{ ч}$). Значения λ и β каждого узла представлены в табл. 3. Выявлены узлы с высоким уровнем риска: подшипниковый — $1.72 \cdot 10^5$ долл., приводной вал-шестерня — $1.16 \cdot 10^5$, редуктор — $2.65 \cdot 10^5$ долл.

ТАБЛИЦА 2. Список узлов драглайна с указанием среднего времени простоя и частоты отказов за 8 лет

Узел драглайна	Среднее время простоя, ч	Частота
Контрольный предохранитель	3.00	1
Верхний и нижний замок опрокидывания	3.00	1
Цепь верхнего подъемника	4.00	1
Прибор внешнего освещения	1.50	3
Стабилизатор блока опрокидывания	4.50	1
Цапфа	2.50	2
Панель управления в кабине оператора	2.50	2
Цепь стабилизатора	1.25	5
Поворотная рама	5.50	1
Корпус и кожух редуктора	2.00	3
Прокладка сцепного устройства	2.33	3
Лыжа	1.75	5
Выключатель цепи	2.38	5
Направляющая	2.50	3
Компрессор	2.50	5
Узел направляющих роликов	6.00	2
Индукционный мотор	4.16	10
Тормозной цилиндр системы поворота	1.67	10
Тормозной цилиндр системы подъема	4.13	8
Тормозной цилиндр системы тяги	2.00	11
L-образный палец	2.05	6
Палец траверсы	1.81	28
Роликовый погон	1.96	23
Кабель подвижного устройства	3.67	30
Цепь нижнего подъемника	2.06	28
Палец нижнего замка опрокидывания	1.61	19
Система управления генератором	2.63	19
Замок тягового каната	5.18	9
Мотор возбуждителя	2.50	21
Палец крепежного хомута	1.57	76
Масляный насос системы поворота	4.10	64
Система управления мотором	3.65	24
Узел замены каната	8.54	14
Мотор вентилятора	4.91	17
Крепежный цепной хомут	3.91	22
Система управления тормозами	4.65	27
Канат опрокидывания	1.97	73
Головка зуба	0.97	13
Система управления электрооборудованием	2.27	69
Шестерня переключателя	6.00	58
Переходник зуба	1.45	307
Якорь генератора	32.46	14
Тяговая цепь	8.00	52
Якорь мотора	29.02	16
Приводной вал-шестерня	110.00	7
Подшипниковый узел	148.00	11
Редуктор	117.10	26

Последствия отказа драглайна могут привести к снижению безопасности и уровня производства, нарушениям здоровья персонала, а также к экономическим и экологическим потерям. Самые серьезные последствия влечет снижение уровня производства. Для количественной оценки этого параметра рассматриваются затраты на простой драглайна (1 ч): $D_c = [(O / S_r) C_p] / DH$, где O — объем вскрышных пород, вынимаемых драглайном за год; C_p — цена 1 т угля; S_r — коэффициент вскрыши; D — число рабочих дней в году; H — среднее количество рабочих часов в сутки [25]; $D_c = [(1363910 / 5) \cdot 1513.29] / (330 \cdot 16) = 78181$ рублей (1138.33 долл.) [26]. Последствия одного отказа каждого узла оценивается так: последствия = затраты на 1 ч простоя \times средний простой для каждого узла. Последствия отказа каждого узла представлены в табл. 3 (β — частота отказов за год, C — стоимость поломки, R — оценка степени риска).

ТАБЛИЦА 3. Значение риска каждого узла, долл.

Узел драглайна	λ	β	C	R
Цепь стабилизатора	$6.91 \cdot 10^{-05}$	0.36	1422	519
Лыжа	$6.81 \cdot 10^{-05}$	0.36	1992	716
Выключатель цепи	$7.15 \cdot 10^{-05}$	0.38	2709	1023
Компрессор	$9.09 \cdot 10^{-05}$	0.48	2845	1366
Индукционный мотор	$1.45 \cdot 10^{-04}$	0.77	4735	3623
Тормозной цилиндр системы поворота	$1.37 \cdot 10^{-04}$	0.72	1901	1374
Тормозной цилиндр системы подъема	$1.56 \cdot 10^{-04}$	0.83	4701	3882
Тормозной цилиндр системы тяги	$1.88 \cdot 10^{-04}$	0.99	2276	2259
Подшипниковый узел	$1.94 \cdot 10^{-04}$	1.02	168474	172304
L-образный палец	$1.42 \cdot 10^{-04}$	0.75	2333	1753
Палец траверсы	$4.00 \cdot 10^{-04}$	2.11	2060	4354
Роликовый погон	$3.35 \cdot 10^{-04}$	1.77	2231	3946
Кабель подвижного устройства	$4.57 \cdot 10^{-04}$	2.41	4177	10079
Цепь нижнего подъемника	$4.89 \cdot 10^{-04}$	2.58	2344	6047
Палец нижнего замка опрокидывания	$3.43 \cdot 10^{-04}$	1.81	1832	3319
Система управления генератором	$3.11 \cdot 10^{-04}$	1.64	2993	4919
Замок тягового каната	$1.29 \cdot 10^{-04}$	0.68	5896	4022
Мотор возбуждителя	$3.02 \cdot 10^{-04}$	1.60	2845	4538
Палец крепежного хомута	$1.17 \cdot 10^{-03}$	6.18	1787	11039
Масляный насос системы поворота	$1.01 \cdot 10^{-03}$	5.33	4667	24888
Система управления мотором	$4.42 \cdot 10^{-04}$	2.33	4154	9694
Узел замены каната	$2.83 \cdot 10^{-04}$	1.49	9721	14531
Мотор вентилятора	$2.72 \cdot 10^{-04}$	1.43	5589	8015
Крепежный цепной хомут	$3.60 \cdot 10^{-04}$	1.90	4450	8461
Система управления тормозами	$3.87 \cdot 10^{-04}$	2.04	5293	10804
Канат опрокидывания	$1.09 \cdot 10^{-03}$	5.76	2242	12903
Головка зуба	$1.90 \cdot 10^{-04}$	1.00	1104	1108
Система управления электрооборудованием	$1.04 \cdot 10^{-03}$	5.49	2584	14189
Шестерня переключателя	$9.05 \cdot 10^{-04}$	4.78	6830	32633
Переходник зуба	$4.50 \cdot 10^{-03}$	23.76	1650	39204
Якорь генератора	$2.18 \cdot 10^{-04}$	1.15	36950	42570
Приводной вал-шестерня	$1.76 \cdot 10^{-04}$	0.93	125217	116362
Тяговая цепь	$7.91 \cdot 10^{-04}$	4.18	9106	38050
Якорь мотора	$2.83 \cdot 10^{-04}$	1.50	33034	49413
Редуктор	$3.77 \cdot 10^{-04}$	1.99	133299	265480

Оценка степени риска. Цель оценки степени риска заключается в решении возможности о его принятии. Для этого значение принимаемого риска должно быть постоянным: 100 тыс. долл. Из табл. 3 видно, что три узла превышают значение принимаемого риска и требуют оценку. Риск данных узлов составляет 60 % общего значения риска. Для выбора эффективной стратегии обслуживания данных узлов драглайна разработана модель метода анализа иерархий.

Выбор стратегии обслуживания с помощью метода анализа иерархий и расчет локального приоритета. Первый этап применения метода анализа иерархий — разработка иерархической структуры выбора стратегии обслуживания. Для парного сравнения собраны данные путем опроса трех экспертов в области горного управления, которые непосредственно занимались техническим обслуживанием драглайна. Для опроса подготовлен опросный лист, включающий критерии, подкритерии и альтернативные варианты. После составляются матрицы суждений на основе экспертных мнений.

В табл. 4 представлены локальные весовые значения критериев и подкритериев для редуктора, подшипникового узла и приводного вала-шестерни, предлагаемые первым экспертом. Показано, что риск обладает максимальным весом относительно других критериев. Это объясняется тем, что отказ драглайна влияет на вскрышные работы и общую производительность добычи. После расчета локальных весовых значений критериев и подкритериев проведена оценка локальных приоритетов стратегий обслуживания на основе подкритериев выбора обслуживания и матрицы суждений первого эксперта.

ТАБЛИЦА 4. Локальные весовые значения критериев и подкритериев

Узел	W_C		W_A		W_B		W_R		Отношение согласованности (OC)
	W_{C1}	W_{C2}	W_{A1}	W_{A2}	W_{B1}	W_{B2}	W_{R1}	W_{R2}	
Редуктор	0.072		0.284		0.169		0.472		0.0170
Подшипниковый узел	0.070		0.258		0.102		0.569		0.0400
Приводной вал-шестерня	0.096		0.236		0.193		0.473		0.0137
Редуктор	0.75	0.25	0.50	0.50	0.25	0.75	0.142	0.857	—
Подшипниковый узел	0.75	0.25	0.50	0.50	0.20	0.80	0.125	0.875	—
Приводной вал-шестерня	0.75	0.25	0.50	0.50	0.25	0.75	0.142	0.857	—

Примечание. W_C — локальные весовые значения затрат; W_A — локальные весовые значения актуальности применения; W_B — локальные весовые значения преимуществ; W_R — локальные весовые значения риска; W_{C1} — локальное весовое значение затрат на оборудование; W_{C2} — локальное весовое значение затрат на обучение персонала; W_{A1} — локальное весовое значение способности выявления дефектов; W_{A2} — локальное весовое значение способности к восстановлению; W_{B1} — локальное весовое значение оптимизации хранения запасных частей; W_{B2} — локальное весовое значение безопасности; W_{R1} — локальное весовое значение частоты отказов; W_{R2} — локальное весовое значение последствий отказа.

Локальные приоритеты данных узлов представлены в табл. 5 с отношением согласованности каждого парного сравнения. Подобным образом проведен расчет локальных весовых значений и локальных приоритетов на основе матриц суждений второго и третьего экспертов. Для дальнейшего расчета глобального приоритета использовались средние значения локальных и глобальных весовых значений.

Расчет глобального приоритета. Глобальные приоритеты стратегий обслуживания рассчитаны с помощью уравнения (1). Расчет выполнен исходя из средних локальных весовых значений критериев и подкритериев выбора стратегии обслуживания, а также средних весовых значений стратегий обслуживания на основе подкритериев выбора стратегии обслуживания. Глобальные приоритеты узлов представлены в табл. 6. Первый столбец показывает альтерна-

тивные варианты различных стратегий обслуживания, первая строка таблиц — среднее локальное весовое значение критериев, вторая — среднее локальное весовое значение подкритериев под каждым критерием, а остальные строки — средние локальные приоритеты каждой стратегии обслуживания под каждым подкритерием. В последнем столбце даны глобальные приоритеты альтернативных вариантов. Чем больше значение глобального приоритета, тем лучше альтернативный вариант. Глобальные приоритеты использованы для выбора наиболее эффективной стратегии обслуживания (табл. 6). Оптимальная стратегия технического обслуживания данных узлов: редуктор — превентивное, подшипниковый узел — периодическое, приводной вал-шестерня — превентивное.

ТАБЛИЦА 5. Локальные приоритеты технического обслуживания

Подкритерий	Периодичное	Превентивное	Предупредительное	Внеплановое	ОС
Редуктор					
Затрата на оборудование	0.169	0.472	0.072	0.284	0.018
Затрата на обучение персонала	0.401	0.068	0.171	0.358	0.012
Способность выявления дефектов	0.135	0.280	0.469	0.114	0.011
Способность восстановления	0.224	0.569	0.132	0.073	0.007
Оптимизация хранения запасных частей	0.254	0.464	0.183	0.097	0.045
Безопасность	0.254	0.566	0.092	0.082	0.021
Частота отказов	0.093	0.572	0.244	0.089	0.011
Последствие отказа	0.112	0.455	0.367	0.064	0.012
Подшипниковый узел					
Затрата на оборудование	0.495	0.164	0.064	0.276	0.007
Затрата на обучение персонала	0.401	0.068	0.171	0.358	0.012
Способность выявления дефектов	0.239	0.127	0.540	0.092	0.045
Способность восстановления	0.592	0.125	0.200	0.081	0.014
Оптимизация хранения запасных частей	0.569	0.131	0.229	0.073	0.006
Безопасность	0.345	0.370	0.185	0.099	0.003
Частота отказов	0.573	0.107	0.253	0.065	0.021
Последствие отказа	0.246	0.207	0.465	0.080	0.032
Приводной вал-редуктор					
Затрата на оборудование	0.169	0.472	0.072	0.284	0.018
Затрата на обучение персонала	0.401	0.068	0.171	0.358	0.122
Способность выявления дефектов	0.137	0.287	0.448	0.358	0.011
Способность восстановления	0.224	0.569	0.132	0.073	0.007
Оптимизация хранения запасных частей	0.222	0.418	0.249	0.109	0.017
Безопасность	0.232	0.546	0.137	0.083	0.019
Частота отказов	0.123	0.581	0.249	0.046	0.044
Последствие отказа	0.132	0.382	0.429	0.055	0.012

ТАБЛИЦА 6. Глобальные приоритеты альтернативных вариантов технического обслуживания

Альтернативный вариант	Затрата		Актуальность применения		Преимущество		Риск		Глобальный приоритет альтернативных вариантов
	О	ОП	ВД	В	Б	ХЗ	ЧО	ПО	
Редуктор									
Периодическое	0.193	0.462	0.126	0.231	0.303	0.294	0.104	0.112	0.169
Превентивное	0.448	0.079	0.349	0.550	0.526	0.465	0.550	0.356	0.410
Предупредительное	0.100	0.180	0.426	0.128	0.091	0.150	0.257	0.445	0.308
Внеплановое	0.256	0.275	0.096	0.087	0.077	0.086	0.061	0.084	0.095
Подшипниковый узел									
Периодическое	0.487	0.462	0.228	0.556	0.412	0.543	0.573	0.286	0.380
Превентивное	0.185	0.079	0.169	0.178	0.270	0.149	0.148	0.172	0.163
Предупредительное	0.066	0.180	0.516	0.194	0.228	0.231	0.207	0.459	0.355
Внеплановое	0.260	0.275	0.084	0.069	0.088	0.075	0.068	0.079	0.085
Приводной вал-шестерня									
Периодическое	0.193	0.462	0.137	0.241	0.228	0.208	0.127	0.129	0.165
Превентивное	0.448	0.079	0.290	0.548	0.568	0.469	0.578	0.360	0.377
Предупредительное	0.100	0.180	0.468	0.137	0.137	0.216	0.238	0.430	0.335
Внеплановое	0.256	0.275	0.095	0.072	0.072	0.103	0.052	0.078	0.093

Примечание. О — обрушение; ОП — обучение персонала; ВД — выявление дефектов; В — восстановление; Б — безопасность, ХЗ — хранение запчастей; ЧО — частота отказов; ПО — последствия отказов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемое обслуживание на основе оценки рисков и модель метода анализа иерархий позволяют определить наиболее эффективную стратегию технического обслуживания узлов драглайна с высоким риском. Получены следующие выводы. С помощью оценки риска можно поставить в приоритет риск, связанный со всеми узлами драглайна, и выявить узлы с высоким уровнем риска. Оценка степени риска демонстрирует значимость расчета риска как функции частоты и последствий отказа, так как некоторые узлы имеют высокую частоту отказа, но небольшие последствия (зуб ковша, система электрического управления, разгрузочный канат, масляный насос механизма поворота, палец подъемной серьги и т. д.). Некоторые узлы имеют низкую частоту отказов, но большие последствия (подшипниковый узел, редуктор, приводной вал-шестерня, якорь электродвигателя и якорь электрогенератора). Совокупность значений риска трех узлов с высоким уровнем риска (подшипниковый узел, редуктор, приводной вал-шестерня) составляет 60 % общего значения риска драглайна. Это показывает влияние отказа данных трех узлов на оптимальную эксплуатацию драглайна.

Модель метода анализа иерархий, разработанная с учетом четырех основных критериев (затрат, актуальности применения, преимуществ и риска), обеспечивает выбор стратегии обслуживания для редуктора, подшипникового узла и приводного вала-шестерни. Она предоставляет локальные весовые значения критериев, подкритериев и локальные и глобальные приоритеты альтернативных вариантов. Локальные приоритеты основаны на подкритериях, а глобальные — на сочетании локальных. Риск имеет максимальное весовое значение относительно других критериев для узлов с высоким уровнем риска (редуктор, подшипниковый узел, приводной вал-шестерня), затем идут актуальность применения, преимущества и затраты

(табл. 6). Это связано с экономическим влиянием риска на эксплуатацию. У периодического обслуживания наивысшее значение локального приоритета подшипникового узла под всеми подкритериями, кроме способности выявления дефекта и снижения последствий. Для редуктора и приводного вала-шестерни превентивное обслуживание имеет наивысшее значение локального приоритета под всеми подкритериями, кроме способности выявления дефекта и снижения последствий. У предупредительного обслуживания максимальные значения под этими подкритериями из-за более эффективного мониторинга дефектов и упреждающих воздействий для минимизации риска. При низких затратах на обучение персонала предупредительное обслуживание имеет низкие значения из-за тщательного планирования и требования больших человеческих ресурсов. Исходя из глобальных приоритетов, стратегия периодического обслуживания наиболее эффективна для подшипникового узла, а стратегия превентивного обслуживания подходит для редуктора и приводного вала-шестерни. Предупредительное обслуживание находится на втором месте для всех трех узлов благодаря более эффективной способности выявления дефектов, которая предупреждает отказ до его возникновения. Такая стратегия позволяет экономить время за счет отказа от ненужного обслуживания и имеет низкие значения в других критериях. Внеплановое обслуживание не подходит из-за высоких затрат и длительного простоя оборудования. Стратегии периодического и превентивного обслуживания предполагают смешанные результаты.

ВЫВОДЫ

Проанализирована основанная на оценке рисков стратегия технического обслуживания одного из четырех драглайнов, работающего на открытой добыче угля на севере Индии. Исходные данные содержат показатели по отказам, обслуживанию и производительности драглайна за 2008–2016 гг. С помощью программного обеспечения EasyFit построены графики функций распределения каждого узла и рассчитана средняя ежегодная частота отказов. С помощью частоты отказов и их последствий определено значение риска каждого узла и выявлены три узла с высоким уровнем риска: подшипниковый узел (риск 172 тыс. долл.), приводной вал-шестерня (риск 116 тыс. долл.) и редуктор (риск 265 тыс. долл.). Данные узлы составляют 60 % от общего значения рисков драглайна.

Методом анализа иерархий на основе расчета глобальных приоритетов выявлено, что стратегия превентивного обслуживания подходит для редуктора (максимальный глобальный приоритет составляет 0.410) и приводного вала-шестерни (максимальный глобальный приоритет составляет 0.377), а для подшипникового узла требуется стратегия периодического обслуживания, которая имеет максимальный глобальный приоритет 0.380.

Ожидается, что внедрение предлагаемого подхода обеспечит эффективную работу по обслуживанию драглайнов с минимизацией последствий отказов, что приведет к более эффективному использованию капитала и основных фондов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mobley R. K.** An introduction to predictive maintenance, New York, Elsevier Sci., 2002.
2. **Golbasi O. and Demirel N.** Optimisation of dragline inspection intervals with time-counter algorithm, Int. J. Min., Reclam. Environ., 2017, Vol. 31, No. 6. — P. 412–425.
3. **Topal E. and Ramazan S.** A new MIP model for mine equipment scheduling by minimizing maintenance cost, Eur. J. Oper. Res., 2010, Vol. 207. — P. 1065–1071.

4. **GoI** Indian petroleum and natural gas statistics 2014–2015, Ministry of Petroleum and Natural Gas, Economics and Statistics Division, Government of India, New Delhi, 2015.
5. **Bania P. J.** Beta titanium alloys and their role in the titanium industry, *J. Miner. Met. Mater. Soc.*, 1994, Vol. 46, No. 7. — P. 16–19.
6. **Annual Report 2017–2018**, Ministry of Coal, Government of India, 2018.
7. **Demirel N. and Golbasi O.** Preventive replacement decisions for dragline components using reliability analysis, *Minerals*, 2016, Vol. 6, No. 2. — P. 51.
8. **Uzgoren N.** Reliability analysis of draglines' mechanical failures, *Maint. Reliab.*, 2010, Vol. 4. — P. 23–28.
9. **Arunraj N. S. and Maiti J.** Risk-based maintenance-techniques and applications, *J. Hazard. Mater.*, 2007, Vol. 142, No. 3. — P. 653–661.
10. **Wang Y., Cheng G., Hu H., and Wu W.** Development of a risk-based maintenance strategy using FMEA for a continuous catalytic reforming plant, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 2012, Vol. 25, No. 6. — P. 958–965.
11. **Golbasi O. and Demirel N.** Risk-based reliability allocation methodology to set a maintenance priority among system components: a case study in mining, *Maint. Reliab.*, 2017, Vol. 19, No. 2. — P. 191–202.
12. **Arunraj N. S. and Maiti J.** Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming, *Saf. Sci.*, 2010, Vol. 48, No. 2. — P. 238–247.
13. **Triantaphyllou E.** Multi-criteria decision making methods: a comparative study. Springer-Science + Business Media B., 2000.
14. **Wang L., Chu J., and J. Wu J.** Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process, *Int. J. Prod. Econ.*, 2007, Vol. 107, No. 1. — P. 151–163.
15. **Bevilacqua M. and Braglia M.** The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2000, Vol. 70, No. 1. — P. 71–83.
16. **Bertolini M. and Bevilacqua M.** A combined goal programming — AHP approach to maintenance selection problem, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2006, Vol. 91, No. 7. — P. 839–848.
17. **Tan Z., Li J., Wu Z., Zheng J., and He W.** An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection, *Saf. Sci.*, 2011, Vol. 49, No. 6. — P. 852–860.
18. **Khan F. I. and Haddara M. R.** Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities, *J. Hazard. Mater.*, 2004, Vol. 108. — P. 147–159.
19. **Hu H., Cheng G., Li Y., and Tang Y.** Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 2009, Vol. 22. — P. 392–397.
20. **Subramanian N. and Ramanathan R.** A review of applications of analytic hierarchy process in operations management, *Int. J. Prod. Econ.*, 2012, Vol. 138, No. 2. — P. 215–241.
21. **Russo R. D. F. S. M. and Camanho R.** Criteria in AHP: a systematic review of literature, *Procedia Comput. Sci.*, 2015, Vol. 55, No. Itqm. — P. 1123–1132.
22. **Saaty T. L.** A scaling method for priorities in hierarchical structures, *J. Math. Psychol.*, 1977, Vol. 15, No. 3. — P. 234–281.
23. **Saaty T. L. and Vargas L. G.** Comparison of eigenvalue, logarithmic least squares and least squares methods in estimating ratios, *Math. Model.*, 1984, Vol. 5, No. 5. — P. 309–324.
24. **Saaty T. L. and Vargas L. G.** Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process, New York, Springer, 2012.
25. **Mishra A.** Reliability analysis of mining equipment using operational data, Unpublished M. Tech Thesis, IIT (BHU), Varanasi, India, 2015.
26. **Exchange Rate Average (US Dollar, Indian Rupee)**, 2018. <https://www.x-rates.com/average/?from=USD&to=INR&amount=1&year=2018>.

*Поступила в редакцию 24/XI 2018
После доработки 12/XII 2019
Принята к публикации 09/VII 2020*