

УДК 621.313.3.004-192:622

Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, В.А. Шевчук, А.А. Шилин

Исследование эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в горнорудной промышленности

Электромеханические системы горнорудного оборудования, эксплуатируемые в условиях подземных выработок, подвергаются постоянному воздействию агрессивной внешней среды (изменения температуры, влажность, запылённость). В связи с этим происходит большое количество внезапных отказов, что недопустимо для алмазодобывающей промышленности ввиду невосполнимых экономических потерь и опасности жизни обслуживающего персонала. В статье рассматривается методика прогнозирования эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности с помощью анализа методом множительных оценок Каплана–Мейера. Методика позволяет анализировать полные и цензурированные данные без необходимости разделения исходной информации на интервалы времени. На примере задачи обеспечения эксплуатационной надёжности рассмотрен механизм метода анализа иерархий, который позволил определить спектр мероприятий, способных наиболее эффективно решить поставленную задачу.

Ключевые слова: электрические машины горнорудного оборудования, прогнозирование эксплуатационной надёжности, системный анализ, анализ выживаемости.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-125-131

Горнорудное оборудование алмазодобывающих комплексов относится к категории опасных производственных объектов с риском техногенных аварий и необходимостью снижения невосполнимых экономических потерь. Обеспечить промышленную безопасность опасного производственного объекта, имеющего в своем составе электропривод, можно на основе обеспечения живучести с применением различных видов резервирования, в том числе повышением эксплуатационной надежности путем анализа работы оборудования с учетом нормативных и сверхнормативных режимов эксплуатации [1–10].

Необходимый уровень эксплуатационной надежности электрических машин (ЭМ), эксплуатируемых в алмазодобывающем комплексе, обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта (ТОиР), в основе которой лежит техническое обеспечение и организация планово-предупредительных ремонтов. Однако такой системой не учитываются количественные показатели надёжности элементов, которые возможно получить из статистической информации об отказах. При наличии достаточной базы эксплуатационной информации возможна организация прогнозирования отказов горного оборудования и электрических машин. Важной особенностью такой информации является наличие цензурированных данных, которые не несут в себе статистической информации в связи с завершением наблюдения. При использовании обычных методов статистического исследования такие данные не учитываются, вследствие чего уменьшается количество эксплуатационной информации и соответственно точность результатов. Целесообразно применение подхода, способного учитывать, как полные, так и цензурированные данные.

Задачу обеспечения эксплуатационной надёжности предлагается рассматривать как упорядоченную иерархическую структуру критериев для достижения необходимой надёжности. Так, в работах

[11, 12] выявлено, что в алмазодобывающем комплексе наиболее подвержены отказам электродвигатели режущего органа проходческих комбайнов АМ-75. Комбайны эксплуатируются в условиях подземной разработки полезных ископаемых, где непрерывное воздействие оказывают такие факторы, как запылённость, влажность, сильные колебания температуры.

Немаловажное значение имеют и многолетнемёрзлые породы. Учитывая, что нормативных документов по разработке подземных месторождений в условиях многолетней мерзлоты нет и необходимые расчёты по надёжности оборудования производятся на основании производственного опыта, то справедливо предположить о дополнительных нагрузках на электропривод режущего органа комбайна со стороны почвы. Задача обеспечения должного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75 стоит достаточно остро, поскольку его внезапный выход из строя несет за собой как экономические убытки, так и ставит безопасность обслуживающего персонала под угрозу.

Анализ выживаемости электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности

Изначально методы анализа выживаемости активно применялись в медицинской и биологической сферах, а также социальных науках и экономике, но затем нашли своё применение и в машиностроении в виде анализа надёжности. Однако в России методы анализа выживаемости до сих пор не получили широкого распространения. Анализ выживаемости представляет собой исследование длительностей от начала до конца наблюдения, в которых объект перестаёт отвечать заданным требованиям, например происходит отказ. В рамках данной работы выживаемость – это доля наблюдаемых объектов, доработавших до определённого времени [13, 14].

Анализ выживаемости обычно выполняется с помощью метода множительных оценок Каплана–Майера. Отличительной особенностью метода множительных оценок Каплана–Майера от традиционных – возможность обработки цензурированных данных и отсутствие необходимости группировать данные. Функцию выживаемости для выборки с цензурированными данными можно представить в виде формулы множительной оценки Каплана–Майера (1) [15–19].

$$S(t) = \prod_{j=1}^t \left(\frac{n-j}{n-j+1} \right)^{\delta(j)}, \quad (1)$$

где n – общее количество событий (отказов); j – порядковый номер отдельного события; $\delta(j) = 1$, если наблюдение полное, и 0, если цензурированное.

Предлагается подвергнуть анализу электродвигатели проходческих комбайнов, поскольку они имеют наибольшее количество отказов в связи с повышенной нагрузкой на рабочие органы.

Данные для анализа получены из журналов и отчётов о ремонте электрических машин проходческих комбайнов АМ-75 и АМ-105, эксплуатируемых в условиях подземных рудников АК «АЛРОСА», накопленные с 2012 г. по август 2017 г.

На рис. 1 рассмотрены кривые выживаемости проходческих комбайнов АМ-75 и АМ-105, где наименьшим уровнем выживаемости обладают электрические машины проходческого комбайна АМ-75. В этом случае критическим временем является интервал с 5000 до 10000 ч с вероятностью доработки 45% и с 13000 до 15000 ч с вероятностью доработки 11%. Об электрических машинах комбайна АМ-105 следует сказать, что первые 10000 ч эксплуатации можно назвать критическими.

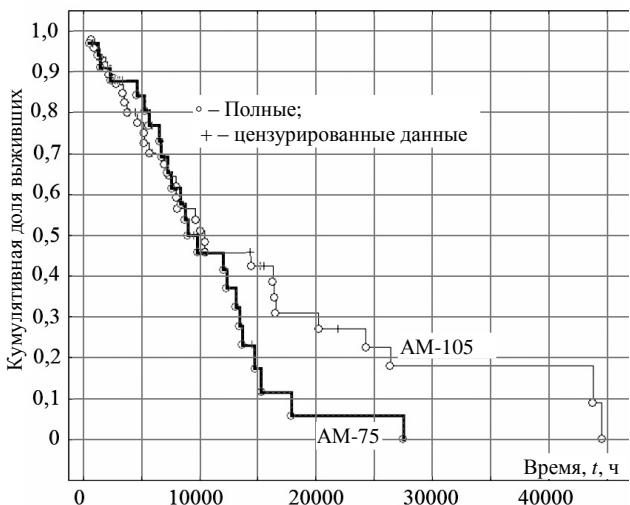


Рис. 1. График сравнения выживаемости электрических машин переменного тока, эксплуатируемых на проходческих комбайнах АМ-75 и АМ-105

На рис. 2 представлены кривые выживаемости электропривода режущего органа комбайна и загребных лап. Кривая выживаемости электропривода режущего органа достаточно крутая и находится

левее, что говорит о низкой выживаемости. Вероятность дожития до 13000 ч составляет 40%. Критическим временем является интервал с 6000 до 9000 ч с вероятностью дожития 42% и с 13000 до 15000 ч с вероятностью дожития 1%.

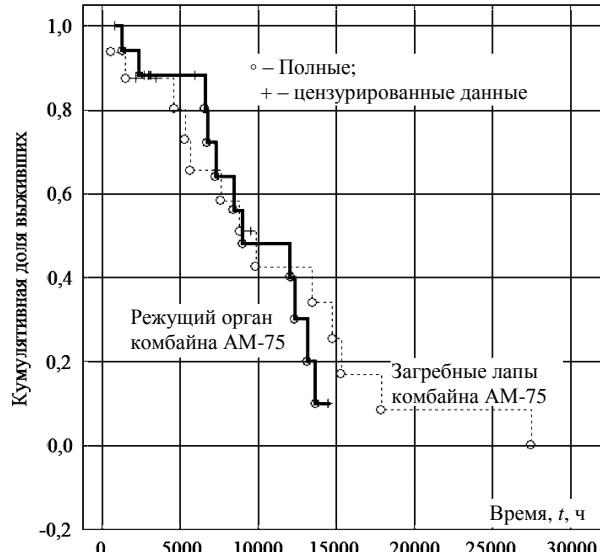


Рис. 2. График сравнения выживаемости электрических машин переменного тока отдельных узлов промышленного комбайна АМ-75

На рис. 3 представлено сравнение выживаемости узлов электродвигателя привода режущего органа проходческого комбайна АМ-75.

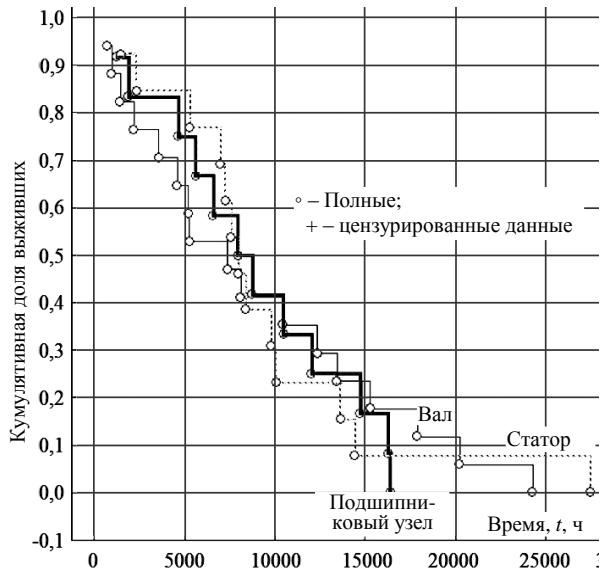


Рис. 3. Сравнение выживаемости узлов электродвигателя привода режущего органа проходческого комбайна АМ-75

Наиболее подвержены отказам элементы подшипникового узла. На кривой выживаемости наблюдается достаточно быстрый спад на протяжении всей эксплуатации с вероятностью дожития до 15000 ч 15%. Критическим временем является интервал с 5000 до 10000 ч эксплуатации. Также стоит обратить внимание на кривую выживаемости эле-

ментов вала, из которой следует, что основное количество отказов происходит в первые 5000 ч. Вероятность дожития до 5000 ч равна 52%. Как видно из кривой выживаемости элементов статора, большой спад привёл к вероятности дожития до 10000 ч, равной 22%.

Таким образом, стоит отметить, что электрические машины привода режущего органа комбайна АМ-75 спустя 5000 ч нуждаются в дополнительном техническом обслуживании.

В таблице выделим критическое время эксплуатации проходческих комбайнов АМ-75 и его элементов. Определение критического времени позволяет прогнозировать отказы электрических машин и повысить эффективность графиков планово-предупредительного ремонта.

**Критическое время эксплуатации
электрооборудования рудника «Мир»**

| Оборудование | Элемент оборудования | Критический интервал времени, ч |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Проходческий комбайн АМ-75 | Общее | 0–2500 5000–10000 12000–15000 |
| | Режущий орган | 6500–9000 12000–14000 |
| | Загребные лапы | 4000–10000 13000–17500 |
| Электрическая машина режущего органа | Вал | 0–7500 |
| | Подшипниковый узел | 0–15000 |
| | Обмотки статора | 5000–10000 14000–14500 |

Исследование задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин переменного тока методом анализа иерархий

Задача обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин является сложной, так как для разных этапов жизненного цикла оборудования характерны разные методы её решения. Одним из решений является поэтапная систематизация данной задачи, охватывающая весь жизненный цикл ЭМ. В алмазодобывающей промышленности задачу обеспечения эксплуатационной надёжности предлагается рассматривать как упорядоченную иерархическую структуру критериев для достижения необходимого уровня надёжности. Существует несколько вариантов представления задачи обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин для алмазодобывающей промышленности – это:

- иерархическая структура, состоящая из мероприятий по техническому обслуживанию, ремонту и диагностике;
- дерево отказов, элементами которого являются отказы ЭМ того или иного горного оборудования.

В данном случае использование системного анализа позволяет решить поставленную задачу вследствие наличия большого количества переплетающихся между собой связей элементов систем, а

также определить полный комплекс мероприятий, необходимых для её решения.

Системный анализ – процесс изучения проблемы с целью определения критериев и подцелей, которые позволяют достичь их эффективным способом. Системный анализ нашёл своё применение среди исследования искусственных систем (социальных, технических, экономических и др.), т.е. в системах, где важную роль играет человек. Однако наиболее широкое распространение получил в области управления, связанной с принятием и обоснованием решений в проектировании, создании и управлении многокомпонентными искусственными системами [12, 20–23].

Системный анализ сочетает экспертные знания и формальные методы [21]. Экспертные знания позволяют находить альтернативные пути решения задачи, что способствует совершенствованию модели принятия решений, однако это может привести и к трудноразрешимым противоречиям.

Метод анализа иерархий (МАИ) – это математический инструмент системного анализа для принятия решений в задачах, не имеющих определённо верного решения, он позволяет эксперту, основываясь на личном опыте, знаниях и понимании проблемы, решить её [12]. Математический алгоритм метода заключается в получении парных матриц с последующим сравнением по критериям различных числовых групп. Эти критерии составляют связанные между собой уровни иерархии, которые могут группироваться в несвязные множества, и структурировать сложные задачи [23].

На рис. 4 в виде дерева целей представлены критерии с наибольшим влиянием на обеспечение заданного уровня эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75. Первый уровень является уровнем общей цели и представляет собой основную задачу. В нашем случае это обеспечение эксплуатационной надёжности ЭМ в алмазодобывающей промышленности. На втором уровне были расположены критерии, влияющие на приращение уровня эксплуатационной надёжности. На третьем и четвёртом уровнях были классифицированы мероприятия по повышению эксплуатационной надёжности, где 1.1.1.1 – ремонт по техническому состоянию; 1.1.1.2 – фирменный метод ТО и ремонта; 1.1.2.1 – ТО по событию; 1.1.2.2 – ТО по регламенту; 1.1.2.3 – ТО по состоянию; 1.1.3.1 – соблюдение эксплуатационных режимов; 1.1.3.2 – энергосберегающие мероприятия; 1.1.3.3 – модернизация оборудования; 1.1.4.1 – средства и сооружения для выполнения ТО и ремонта; 1.2.1.1 – тестовое диагностирование; 1.2.1.2 – рабочее диагностирование; 1.2.1.3 – экспресс-диагностирование; 1.3.1.1 – параметрическое оценивание надёжности; 1.3.1.2 – непараметрическое оценивание надёжности; 1.3.1.3 – определение работоспособного интервала времени с заданной вероятностью; 1.3.1.4 – определение вероятности работоспособности в определенный интервал времени.

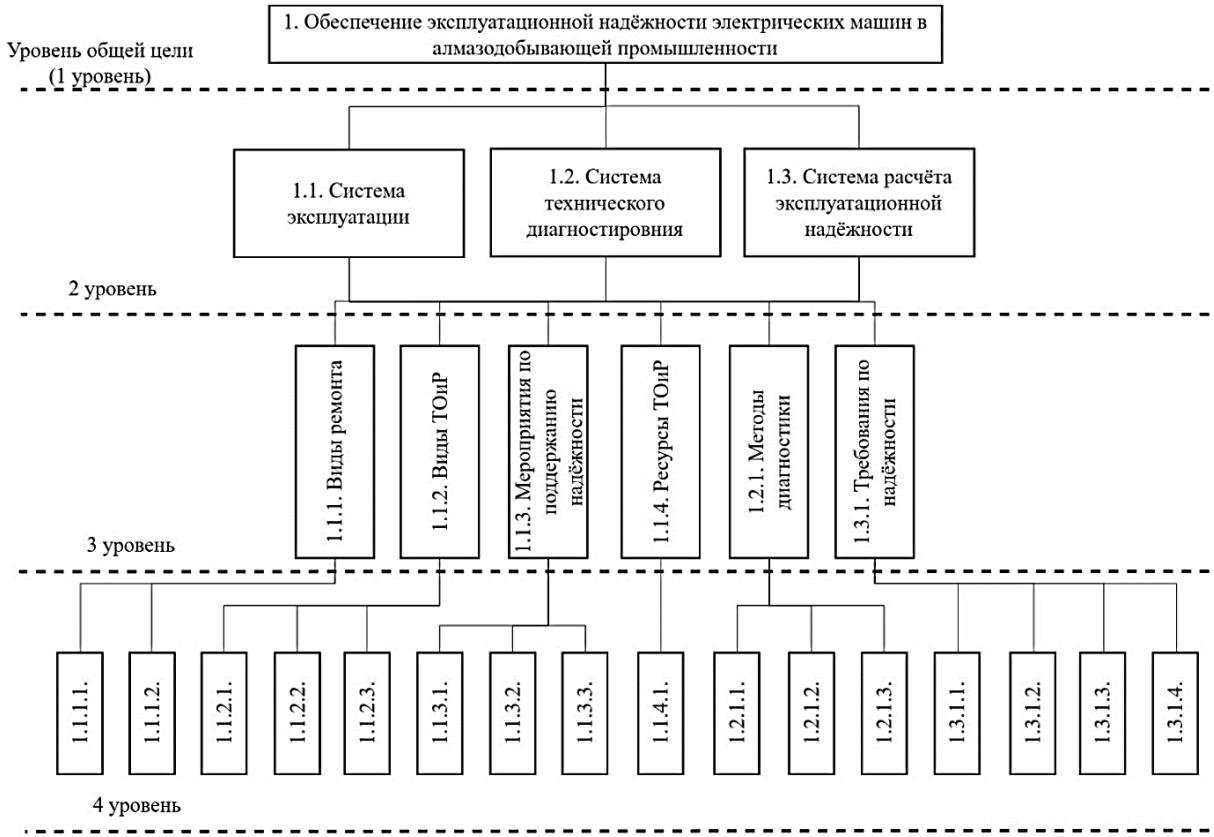


Рис. 4. Дерево целей для задачи по обеспечению эксплуатационной надёжности ЭМ режущего органа проходческого комбайна АМ-75

На примере расчёта критерииев 2-го уровня относительно главной цели рассмотрим работу механизма МАИ [11, 12]. После построения дерева целей экспертами заполняется матрица парных сравнений порядка n (n – количество критерииев). Для данной работы экспертные оценки были получены от инженеров алмазодобывающего комплекса в г. Мирный (Якутия). Такая матрица является квадратной, обратно симметричной с единицами на главной диагонали. Сравнение происходит между критерииами в строчках с критерииами в столбцах по правилам (2) [24–26]:

$$x_{ij} = x; \quad x_{ij} = \frac{1}{x}; \quad x_{ij} = x_{ji} = 1, \quad (2)$$

где x – оценка эксперта по 9-балльной шкале, 1 означает равную важность, 9 – полное превосходство одного критерия над другим.

Например, при сравнении пары критерииев 1.1 и 1.3. эксперт рассчитывает, что первый умеренно превосходит второй и соответствует цифре 3. Это значит, что паре критерииев 1.3 и 1.1 автоматически соответствует значение 1/3. Далее по формуле (3) находим геометрическую сумму каждой строки и по (4) их сумму:

$$a_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{ij}}, \quad (3)$$

$$\sum a_i = a_1 + a_2 + \dots + a_n. \quad (4)$$

Компонентами нормализованного вектора приоритетов являются отношения геометрической суммы строк на общую сумму и рассчитываются по формуле (5):

$$V_i = \frac{a_i}{\sum a_i}. \quad (5)$$

В алгоритм МАИ заложен расчёт индекса согласованности (ИС), который необходим для проверки оценок эксперта на согласованность [27]. Для начала нужно произвести расчёт максимального собственного значения матрицы λ_{\max} по (6). Чем ближе значение λ_{\max} к порядку матрицы n , тем выше будет её значение согласованности ($\lambda_{\max} \geq n$) [24, 25]:

$$\lambda_{\max} = V_1 R_1 + V_2 R_2 + \dots + V_n R_n, \quad (6)$$

где R_n – сумма элементов n -го столбца.

Расчёт ИС производится по следующей формуле (7):

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (7)$$

Значение ИС необходимо сравнить с величинами средней согласованности (СС), которые были получены в работе [21] для матриц порядка от 1 до 15 (таблица). Отношение ИС к СС называется отношением согласованности (ОС) (8):

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СС}}. \quad (8)$$

Значения величин ОС и ИС $\leq 0,1$ говорят о том, что матрица согласована. Однако в системах с боль-

шим количеством критериев допускается величина ОС $\leq 0,2$ [20, 21, 28, 29].

Согласно проведённому анализу, из критериев третьего уровня наиболее сильное влияние на главную цель имеют мероприятия по поддержанию надёжности (критерий 1.1.3) с коэффициентом относительной важности, равным 0,26 (рис. 5).

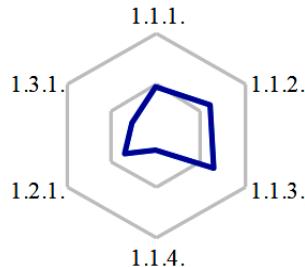


Рис. 5. Диаграмма значимости критериев 3 уровня:
 1.1.1 – виды ремонта; 1.1.2 – виды ТОиР;
 1.1.3 – мероприятия по поддержанию надёжности;
 1.1.4 – ресурсы ТОиР; 1.2.1 – методы диагностики;
 1.3.1 – требования по надёжности

Третий уровень дерева целей является промежуточным, в котором были структурированы критерии четвертого уровня, что в дальнейшем позволило произвести оценку только тех критериев, которые имеют непосредственное отношение к весомому критерию 3-го уровня. Согласно дальнейшему анализу, критерий «Модернизация оборудования» (с КОВ, равным 0,596) наиболее сильно влияет на главную цель. В связи с агрессивной средой эксплуатации элементы ЭМ комбайна подвергаются постоянному износу даже во время простоя. От повышенной влажности происходит коррозия металлических деталей, которая ухудшает электрические свойства. Из-за повышенной запылённости загрязняется изоляция, что приводит к дальнейшему её пробою, также забивается смазка подшипникового узла, чем вызывается его быстрый износ. Длительная работа в условиях высокой запылённости образовывает слой пыли на обмотках, что приводит к повышению температуры выше нормы и дальнейшему отказу.

Выводы

В ходе исследования были получены следующие результаты. В качестве исследуемых объектов были рассмотрены проходческие комбайны АМ-75 и АМ-105. В результате было выявлено, что наиболее низким уровнем выживаемости обладает проходческий комбайн марки АМ-75 (вероятность доработки до 15000 ч – 11%). Далее были проанализированы отказы рабочих элементов проходческого комбайна АМ-75. Анализ показал, что режущий орган комбайна имеет наименьший уровень выживаемости (вероятность доработки до 15000 часов – 1%). Используемый метод анализа также помог определить наиболее подверженный дефектам узел ЭМ режущего органа комбайна АМ-75, им является подшипниковый узел (вероятность доработки до 15000 – 15%). Отказы объясняются агрессивными факторами внешней среды, а также дополнительными нагрузками на электропривод многолетнемерзлыми поро-

дами. Исходя из полученных графиков, была составлена таблица критических периодов времени проходческого комбайна АМ-75 и его элементов. Определение критического времени позволяет прогнозировать отказы электрических машин и тем самым повысить эффективность графиков планового предупредительного ремонта.

Благодаря методу анализа иерархий получена возможность систематизировать задачу обеспечения эксплуатационной надёжности. Критерий «Модернизация оборудования» (с КОВ, равным 0,596) наиболее сильно влияет на главную цель. В связи с агрессивной средой эксплуатации элементы ЭМ комбайна подвергаются постоянному износу даже во время простоя. От повышенной влажности (80–98%) происходит коррозия металлических деталей, которая ухудшает электрические свойства. Из-за повышенной запылённости ($70\text{--}695 \text{ мг}/\text{м}^3$) происходит загрязнение изоляции, что приводит к дальнейшему её пробою, также забивается смазка подшипникового узла, чем вызывается его быстрый износ. Длительная работа в условиях высокой запылённости приводит к образованию слоя пыли на обмотках, что приводит к повышению температуры выше нормы.

Результаты, полученные в работе, показывают, что в случае с проходческим комбайном АМ-75 необходимо не только усовершенствование системы технического обслуживания и ремонта, но и модернизация самих узлов, наиболее подверженных факторам внешней среды.

Литература

1. Odnokopylov G.I. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015) / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66, № 1. – P. 1–6.
2. Odnokopylov G.I. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66, № 1. – P. 1–7.
3. Odnokopylov G.I. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 24–29.
4. Odnokopylov G.I. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–5.
5. Odnokopylov G.I. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–6.
6. Odnokopylov G.I. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes / G.I. Odnokopylov, I.A. Rozaev // IFOST-2016: 11th International Forum on Strategic Technology, Novosibirsk, 01–03 Jun 2016 / Novosibirsk State Technical University. – 2016. – Vol. 2. – P. 140–144.

7. Odnokopylov G.I. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities / G.I. Odnokopylov, D.Y. Sarkisov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2017. – Vol. 328, № 3. – P. 85–95.
8. Odnokopylov G.I. Evaluation of survivability degree of responsible building structures under shock wave loading / G.I. Odnokopylov, D.Y. Sarkisov, E.A. Butuzov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2018. – Vol. 329, № 12. – P. 122–135.
9. Determination of vitality parameters of protected critical engineering structures under shockwave loading / G.I. Odnokopylov, O.G. Kumpyak, Z.R. Galyautdinov, D.R. Galyautdinov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330, № 4. – P. 110–125.
10. Odnokopylov G.I. Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry / G.I. Odnokopylov, V.A. Shevchuk, Y.N. Dementyev // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330, № 5. – P. 131–140.
11. Ruan L. Different influence of cooling method to stator bar insulation characteristics in pumped storage units / L. Ruan, J. Chen, G. Gu // Transactions of China Electrotechnical Society. – 2017. – Vol. 32. – № 14. – P. 246–251.
12. Shevchuk V.A. Survival analysis of a.c. machines in the diamond industry using the Kaplan-Meier estimator / V.A. Shevchuk, O.P. Muravlev, O.O. Stolyarova // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 141. – P. 1–4.
13. Боровиков В.П. *Статистика. Искусство анализа данных на компьютере*. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
14. Xian L. *Survival analysis. Models and applications*. – Higher Education Press, 2012. – 446 p.
15. Van den Hout A. *Multi-state survival models for interval-censored data*. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 257 p.
16. Moore D.F. *Applied survival analysis using R*. – New York: Springer, 2016. – 234 p.
17. Халафян А.А. *STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учеб.* – М.: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.
18. Klein J.P. *Handbook of survival analysis* / J.P. Klein, H.C. van Houwelingen, J.G. Ibrahim, T.H. Scheike. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 632 p.
19. Гусев В.В. *Мониторинг и диагностика электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности: автореф. дис. ... канд. техн. наук*. – Томск, 2010. – 22 с.
20. The use of a special software for induction motor diagnostics in the diamond industry / V.A. Shevchuk, O.P. Muravlev, O.O. Stolyarova, V.P. Shevchuk // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 91. – P. 1–4.
21. Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархии*. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
22. Шевчук В.А. *Анализ вероятности безотказной работы электрических машин в алмазодобывающей промышленности* / В.А. Шевчук, О.П. Муравлев // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 4 (138). – С. 39–46.
23. Гусев В.В. *Системный анализ эффективности функционирования электрических машин в горнодобывающем комплексе* / В.В. Гусев, О.П. Муравлев, В.П. Шевчук // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 74–78.
24. Emrouznejad A, Ho W.. *Fuzzy analytic hierarchy process*. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 407 p.
25. Safety evaluation for bridge crane based on FTA and AHP / S. Fei, L. Xiangdong, F. Yali // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 207. – P. 1–4.
26. Макарова И.Л. *Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья* // Символ науки. – 2015. – № 7. – С. 87–95.
27. Деордица Ю.С. *Интеллектуальные системы поддержки принятия решений*. – Луганск: ВНУ, 2005. – 64 с.
28. Evans G.W. *Multiple criteria decision analysis for industrial engineering: methodology and applications*. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 467 p.
29. Khazaii J. *Advanced decision making for HVAC engineers: creating energy efficient smart buildings*. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 191 p.

Однокопылов Георгий Иванович

Д-р техн. наук, профессор отд. электротехники и электротехники Инженерной школы энергетики (ОЭЭ ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 56-32-55
Эл. почта: ogiz@ya.ru

Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: 8 (382-2) 60-61-06
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Шевчук Владислав Алексеевич

Аспирант ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-983-238-78-17
Эл. почта: shevchukvlal@yandex.ru

Шилин Александр Анатольевич

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Тел.: +7-903-954-00-88
Эл. почта: shilin@tpu.ru

Odnokopylov G.I., Bukreev V.G., Shevchuk V.A., Shilin A.A. **Exploration AC electrical machines operational reliability in mining industry**

Mining equipment for underground workings is subjected to constant exposure to aggressive environment (temperature changes, humidity, dust). In this regard, a large number of sudden failures occur, which are unacceptable for the mining industry due to irreparable economic losses and the danger of the worker's lives of the staff. The article discusses the method for predicting the operational reliability of AC electrical machines in the mining industry using the Kaplan-Meier method of multiple valuation. The method allows analyzing complete and censored data. Using the example of the task of ensuring operational reliability, we consider the mechanism of the hierarchy analysis method, which allowed to determine the range of measures that can most effectively solve the problem.

Keywords: reliability of electric machines, prediction of operational reliability, mining industry, system analysis, survival analysis.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-125-131

References

1. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–6.
2. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned

- Switched-reluctance drive. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–7.
3. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 24–29.
4. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) proceedings*, 2015, pp. 1–5.
5. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) proceedings*, 2015, pp. 1–6.
6. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes. *2016 The 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) proceedings*, 2016, pp. 140–144.
7. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Y. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 85–95.
8. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Y., Butuzov E.A. Evaluation of survivability degree of responsible building structures under shock wave loading. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 122–135.
9. Odnokopylov G.I., Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Determination of vitality parameters of protected critical engineering structures under shock-wave loading. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 110–125.
10. Odnokopylov G.I., Shevchuk V.A., Dementyev Y.N. Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 131–140.
11. Ruan L., Chen J., Gu G. Different influence of cooling method to stator bar insulation characteristics in pumped storage units. *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, vol. 32, no. 14, pp. 246–251.
12. Shevchuk V.A., Muravlev O.P., Stolyarova O.O. Survival analysis of a.c. machines in the diamond industry using the Kaplan-Meier estimator. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 141, pp. 1–4.
13. Borovikov V.P. *Statistica. Iskusstvo analiza dannyh na komputere* [Statistica. Art of analyzing data on a computer]. SPB, Piter Publ., 2003. 688 p.
14. Liu X. Survival analysis. *Models and applications*. Higher Education Press Publ., 2012. 446 p.
15. Van den Hout A. *Multi-state survival models for interval-censored data*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2016, 257 p.
16. Moore D.F. *Applied survival analysis using R*. New York, Springer Publ., 2016, 234 p.
17. Halafyan A.A. *Statistica 6. Statisticheskii analiz dannykh* [Statistica 6. Statistical data analysis]. Moscow, Bynom-press Publ., 2007. 512 p.
18. Klein J.P., Van Houwelingen H.C., Ibrahim J.G., Scheike T.H. *Handbook of survival analysis*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2014, 632 p.
19. Gusev V.V. Monitoring i diagnostika elektricheskikh mashin peremennogo toka v almazodobyvushchii provyshlennosti [Monitoring and diagnostics of AC electrical machines in the diamond industry]. Tomsk, 2010, 22 p.
20. Shevchuk V.A., Muravlev O.P., Stolyarova O.O., Shevchuk V.P. The use of a special software for induction motor diagnostics in the diamond industry. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 91, pp. 1–4.
21. Saaty T. *The analytic hierarchy process planning, priority setting, resource allocation*. New York, McGraw-Hill Publ., 1993, 320 p.
22. Shevchuk V.A., Muravlev O.P. Analysis of failure-free operation probability for electrical machines in the diamond industry. *Mining equipment and electrical engineering*, 2018, vol. 4, no. 138, pp. 39–46 (in Russ.).
23. Gusev V.V., Muravlev O.P., Shevchuk V.P. System analysis of the performance of electric machines in the mining complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 74–78 (in Russ.).
24. Emrouznejad A., Ho W. *Fuzzy analytic hierarchy process*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2018, 407 p.
25. Fei S., Xiangdong L., Yali F. Safety evaluation for bridge crane based on FTA and AHP. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 207, pp. 1–6.
26. Makarova I.L. Analysis of methods for determining weights in the integral index of public health. *Symbol of science*, 2015, no. 7, pp. 87–95 (in Russ.).
27. Deordica Y.S. *Intellektual'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenij* [Intelligent Decision Support Systems]. Lugansk, VNU Publ., 2005, 64 p.
28. Evans G.W. *Multiple criteria decision analysis for industrial engineering methodology and applications*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2018, 467 p.
29. Khazaii J. *Advanced decision making for HVAC engineers creating energy efficient smart buildings*. Switzerland, Springer International Publ., 2016, 191 p.

Georgy I. Odnokopylov

Doctor of Engineering Science, Professor
Division for Power and Electrical Engineering
School of Energy & Power Engineering
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Tel.: +7 (382-2) 56-32-55
Email: ogiz@ya.ru

Victor G. Bukreev

Doctor of Engineering Science, Professor
Division for Power and Electrical Engineering
School of Energy & Power Engineering
National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Tel.: +7 (382-2) 60-61-06
Email: bukreev@tpu.ru

Vladislav A. Shevchuk

PhD student, Division for Power and Electrical Engineering
School of Energy & Power Engineering NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Tel.: +7-983-238-78-17
Email: shevchukvlal@yandex.ru

Aleksander A. Shilin

Doctor of Engineering Science, Professor,
Power Engineering School, Department of Electric Power
and Electrical Engineering, NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Phone: +7-903-954-00-88
Email: shilin@tpu.ru