

Шевчук Владислав Алексеевич¹, аспирант, Муравлев Олег Павлович¹, доктор техн. наук, профессор

¹ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30

E-mail: vashevchuk@tpu.ru

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация: Актуальность. Электроприводы, применяемые для горного оборудования в алмазодобывающей промышленности, можно отнести к категории «критичных», поскольку от их надёжности во многом зависит работоспособность всего алмазодобывающего комплекса. Отказы и внеплановые остановки оборудования, даже на короткое время, приводят к потере дохода и времени, дополнительным расходам на ремонт, также ставят под угрозу безопасность персонала и порой может привести к техногенным катастрофам. Чтобы минимизировать время простоя и исключить внезапный отказ необходима своевременная диагностика и ремонт с применением современных технологий.

Цель работы. Определить критическое время вероятности безотказной работы и наиболее подверженные отказам узлы групп электрических машин переменного тока, эксплуатируемых в алмазодобывающей промышленности, методом множительных оценок Каплана-Мейера.

Методы исследования. Статистические методы определения количественной оценки показателей эксплуатационной надёжности.

Результаты. В графическом и табличном виде получены данные вероятности безотказной работы горного оборудования для различных интервалов времени. Определены критические интервалы времени электрооборудования, а также выявлены наиболее дефектные узлы. Такие данные могут быть использованы для повышения эффективности планово-предупредительных ремонтов и прогнозирования состояния электрических машин переменного тока в алмазодобывающей промышленности.

Ключевые слова: алмазодобывающая промышленность, вероятность безотказной работы, выживаемость, статистика, метод множительных оценок Каплана-Мейера.

Информация о статье: принята 05 августа 2018 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2018-4-39-45

Введение

За последнее время в сфере диагностики и ремонта электрических машин (ЭМ) достигнуты значительные успехи. Связано это как с постоянно совершенствующейся системой планово-предупредительных ремонтов (ППР), так и с внедрением современных высокотехнологичных методов диагностики и информационных технологий. Однако, в алмазодобывающей промышленности так или иначе встречаются внезапные выходы из строя электродвигателей, которые соответственно несут экономические потери во время простоя, что недопустимо.

Теоретическая часть

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 тре-

бованиям, например, происходит отказ. В нашем случае выживаемость - это доля наблюдаемых объектов, доработавших до определённого времени [1-8].

Подобный подход необходим для принятия решений, который позволят своевременно принять меры по выявлению возможных рисков и воздействовать на них до наступления отказа. Одним из важнейших показателей надёжности ЭМ является безотказность, что подчеркивает актуальность задачи её оценки. Согласно ГОСТ 27.002-2015 и ISO 2394:2015, безотказность - это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки [9, 10]. В нашем случае, исследуемая функция выживаемости, является функцией безотказности и представляет собой вероятность работоспособности объекта больше некоторого времени t .

На практике неоднократно происходят случаи, когда при диагностике выявляются дефекты того или иного узла, например, износ наружного кольца подшипника. Однако несмотря на то, что данный дефект и не вызывает остановку ЭМ, продолжать её работу не рекомендуется по причине вероятности

Таблица 1. Наблюдаемые электрические машины
Table 1. Observed electrical machines

№	Марка	Изготовитель	Мощность, кВт	Тип установки
1	МЕЕН-140-EV	Германия	9	Площадочный вибратор
2	2SG4 225S-4	Германия	36	Режущий орган комбайна АМ-75
3	A250 M6	Россия	55	Насос
4	dAML 250 LX2-4 AX	Германия	90	Вентилятор
5	3SG4 315M-4	Польша	132	Режущий орган комбайна АМ-105
6	BAO2-280\2Y25	Россия	200	Насос
7	d2PRW X250/31-KL	Германия	200	Дизельный генератор АД-75
8	DSK250 H6	Польша	200	Загребные лапы комбайна АМ-75
9	d2PRWX280	Китай	315	Режущий орган комбайна АМ- 105, Загребные лапы комбайна АМ-105
10	A4-400X-6	Россия	400	Насос
11	BAO7A	Молдавия	800	Насос
12	РИЦ	Германия	1000	Насос
13	СДМ-15-49-6Y3	Россия	1600	Грохот
14	SK 160 L\4 BRE250	Россия	15	Мельница

внезапного выхода из строя и безопасности персонала. В связи с этим организуется мероприятие по замене подшипника, а полученная наработка является цензурированной по отношению к дефекту подшипника. Однако, если нет возможности подшипникам доработать до отказа, тогда следует данное событие считать отказом. Результатом статистической обработки при этом будут заниженные показатели, вследствие чего создастся некоторый запас по эксплуатационной надежности. Следует принять во внимание, что в работе анализируемые данные представляют собой время наработки между отказами различного горного оборудования, из которого можно получить среднее время безотказной работы. Но так как наблюдения ограничены определенным промежутком времени, то справедливо предположить, что в выборке существуют такие неполные данные, которые не содержат в себе информацию об отказе. Полные данные также могут отсутствовать по причине человеческого фактора. При использовании стандартных методов статистики цензурированные данные исключаются, что может заметно сократить количество данных и снизить точность конечного результата исследования.

Цензурированные данные – это данные, не содержащие в себе информацию о необходимом событии. Цензурирование различают двух типов [3, 11 - 13]:

- I тип (фиксированное цензурирование), при котором заранее задаётся время наблюдения;
- II тип (случайное цензурирование), при котором задаётся доля отказов, но время не фиксируется.

В зависимости от направления различают следующие виды цензурирования:

- правое, при котором известны начало и конец наблюдения. Конец наблюдения происходит по причине отказов, технического обслуживания и прочее;

- левое, при котором время начала наблюдения неизвестно, вследствие чего время от начала эксплуатации ЭМ до начала наблюдения не будет учтена.

В частых случаях цензурирование может возникнуть в разные периоды времени по причине планового технического обслуживания, поэтому по кратности цензурирование бывает [14, 15]:

- однократное, если цензурирование наступило в один момент;
- многократное, если оно наступило в разные периоды.

В исследовании рассматривается однократное цензурирование справа I типа.

Экспериментальная часть

Расчет вероятности безотказной работы и построение графиков выполнены с помощью программного пакета для статистического анализа «Statistica».

Имеем массив данных, в котором содержится информация об отказах и их количестве горного электрооборудования. Данные ЭМ эксплуатируются на рудниках «Интернациональный» и «Мир», обогащательной фабрике №3 города Мирный. Массив получен из журналов и отчетов о ремонте, накопленных с 2012 года по 2018 года.

В нашем случае анализ безотказности следует выполнить с помощью метода множительных оценок Каплана-Мейера. Отличительной особенностью метода множительных оценок Каплана-Мейера от более традиционных – возможность об-

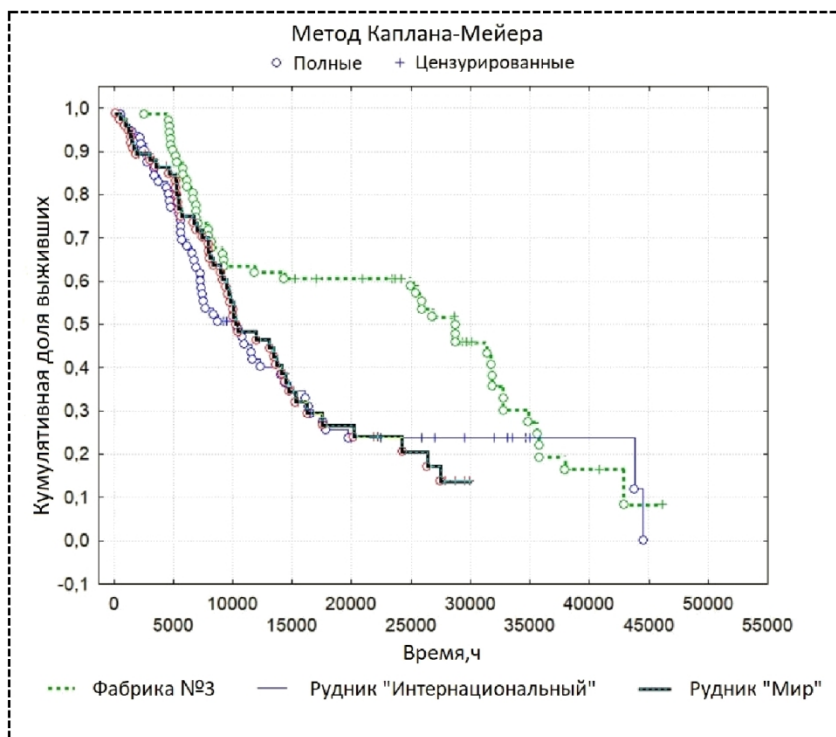


Рис. 1. График сравнения безотказности ЭМ между промышленными объектами г. Мирного

Fig. 1. Graph comparing failure-free operation of electrical machines of industrial objects in the city of Mirny

работки цензурированных данных и отсутствие необходимости группировать данные.

Функцию безотказности для выборки с цензурированными данными можно представить в виде формулы множительной оценки Каплана-Мейера [1, 2, 4-6, 15]:

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

где n – общее количество событий (отказов); j – порядковый номер отдельного события; $\sigma(j) = 1$, если наблюдение полное, и 0, если цензурированное; \prod – произведение по всем наблюдениям j , завершившимся к моменту t .

График функции (1) называется кривой безотказности.

Рассмотрим графики функции безотказности, полученные из выборки. На рис. 1 представлен график сравнения безотказной работы ЭМ переменного тока, эксплуатируемых на рудниках «Интернациональный», «Мир» и обогатительной фабрике №3.

Следует обратить внимание на кривую безотказности рудника «Мир», которая является самой короткой из представленных. Присутствует резкий спад кривой после 6000 часов с

вероятностью доработки до 10000 часов – 48%. Вероятность доработки до 30000 часов составляет 11%. В начале происходит период приработки, происходит отбраковка конструктивных и производственных недостатков, также проявляются дефекты, возникшие при перевозке и установке. Затем наблюдается спад и уже после происходит износ элементов ЭМ. Что касается других объектов, то относительно сходство кривых безотказности рудников «Интернациональный» и «Мир» объясняется относительно одинаковыми подземными условиями эксплуатации и ЭМ. Однако их большая разница в длине говорит о необходимости проведения дополнительных мероприятий по техническому обслуживанию.

Про ЭМ комбайна АМ-105 следует сказать, что первые 10000 часов эксплуатации можно назвать критическими. Две эти группы объединяет достаточно резкий спад уровня безотказности в начале периода эксплуатации, что предполагает, как начальную приработку электродвигателей. Но на кривой безотказности ЭМ комбайна АМ-75 мы наблюдаем достаточно резкий спад практически до самого конца. Дополнительные мероприятия рекомендуются проводить после 10000 часов, так как именно в этот момент мы можем наблюдать нормализацию

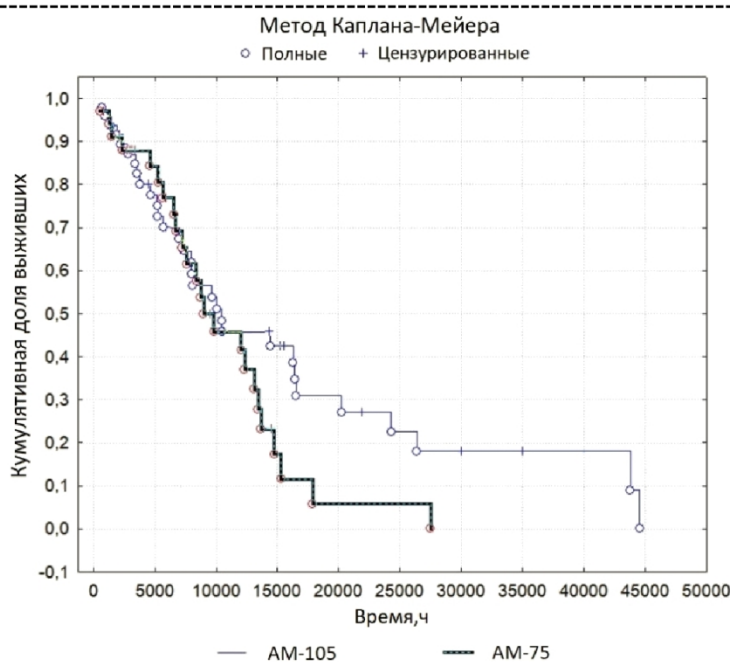


Рис. 2. График сравнения безотказности ЭМ переменного тока, эксплуатируемых на проходческих комбайнах АМ-75 и АМ-105 на руднике «Мир»

Fig. 2. Graph comparing failure-free operation of electrical machines operated on roadheaders AM-75 and AM-105 at the mine "Mir"

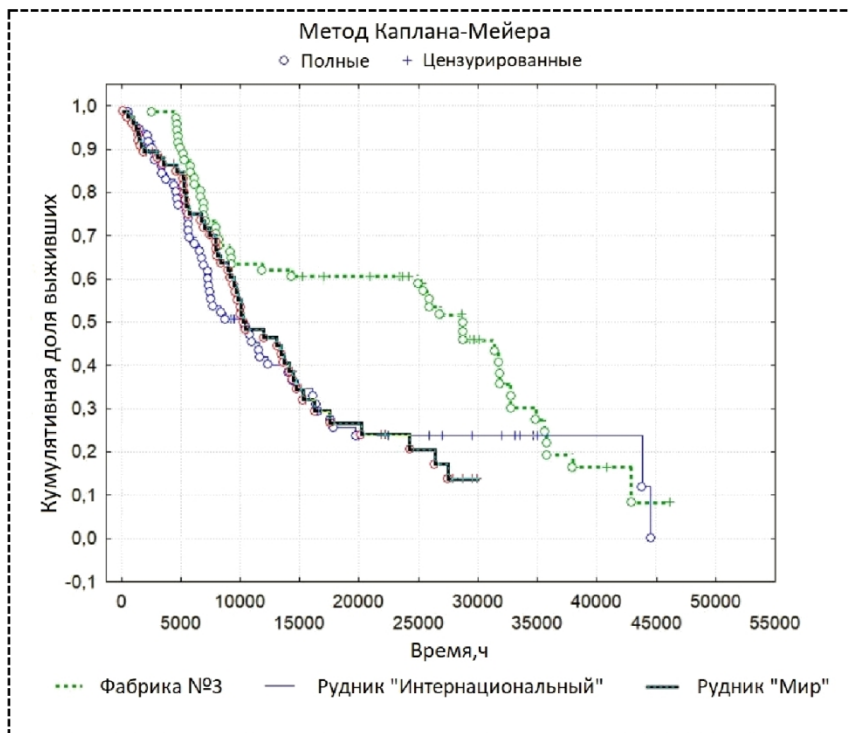


Рис. 3. График сравнения безотказности ЭМ переменного тока, эксплуатируемых на вентиляторах и насосах на руднике «Мир»

Fig. 3. Graph comparing failure-free operation of electrical machines operated on fans and pumps at the mine «Mir»

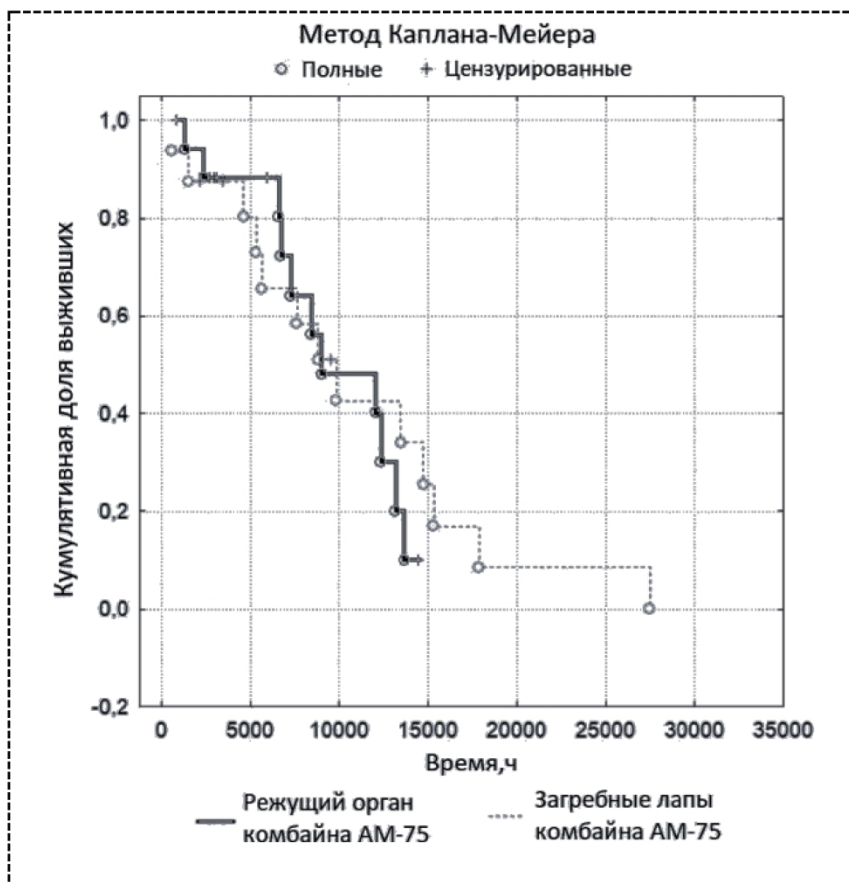


Рис. 4. График сравнения безотказности ЭМ переменного тока отдельных узлов промышленного комбайна АМ-75

Fig. 4. Graph comparing failure-free operation of electrical machines of separate assemblies of the industrial combine AM-75

одной из ключевых и вследствие агрессивной окружающей среды большая часть отказов приходится на них.

Что касается вентиляторных установок (рис. 3), то их критическое время наступает после 5000 часов с вероятностью доработки 65%. У насосных агрегатов критическое время наступает после 5200 часов до 12000 часов с вероятностью доработки 50%.

Кривая безотказности электропривода режущего органа комбайна АМ-75 (рис. 4) достаточно крутая и находится левее, что говорит о низкой безотказности. Вероятность доработки до 13000 часов составляет 40%. Критичными являются часы с 6000 до 9000 часов с вероятностью доработки 42% и с 13000 до 15000 часов с вероятностью доработки 1%.

Согласно карте распространения многолетнемерзлых пород г. Мирный находится в области, где вечная мерзлота достигает до -400 м. Глубина подземного рудника «Мир» за 44 года эксплуатации составила 520 метров, однако больше количество горизонтов расположено до отметки в -400 м (горизонты -210, -310, -410). Справедливо предположить о дополнительных нагрузках на электропривод режущего органа комбайна со стороны вечной мерзлоты. Недостаточный уровень надёжности электропривода режущего органа комбайна связан с вечной мерзлотой почвы, которая оказывает дополнительные нагрузки.

С помощью метода множительных оценок Каплана-Мейера, имея в распоряжении необходимые данные об отказах, можно определить критическое время для каждого узла. Это поможет создать более эффективный график планово-предупредительного ремонта данного электродвигателя.

В нашем случае, согласно рис. 5, наиболее подвержены дефектам элементы подшипникового узла. На кривой безотказности наблюдается достаточно быстрый спад на протяжении всей эксплуатации с вероятностью доработки до 15000 часов 15%. Критический период наступает с 5000 часов до

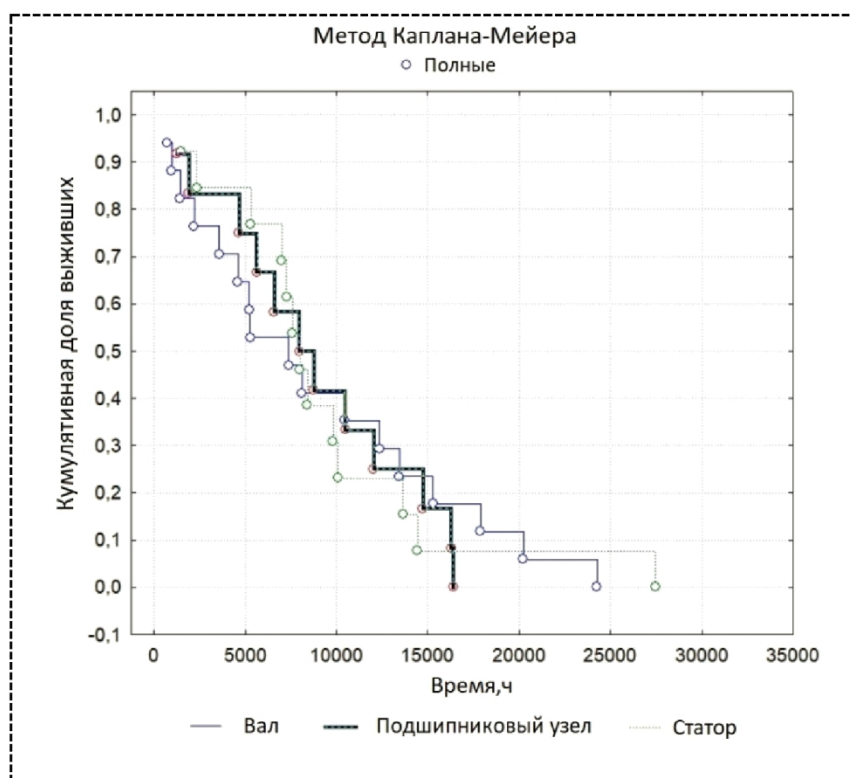


Рис. 5. График сравнения безотказности узлов электродвигателя привода режущего органа промышленного комбайна AM-75

Fig. 5. Graph comparing failure-free operation of electric drive assemblies of the cutting body of the industrial combine AM-75

10000 часов. Также стоит обратить внимание на кривую безотказности элементов вала, из которого следует, что основное количество отказов происходит в первые 5000 часов. Вероятность доработки до 5000 часов равна 52%. Как видно из кривой безотказности элементов статора, большой спад привёл к вероятности доработки до 10000 часов равной 22%.

В таблице 2 выделено критическое время электрооборудования рудника «Мир». Определение критического времени оборудования позволит повысить эффективность графиков технического обслуживания и ремонта, и прогнозировать наибольший риск выхода из строя в определённых интервалах.

Таблица 2. Критическое время электрооборудования рудника «Мир»

Table 2. Critical time of electrical equipment of the mine «Mir»

Оборудование	Критический интервал времени, часы
Проходческий комбайн AM-105	0 – 10000
Проходческий комбайн AM-75	0 – 2500 5000 – 10000 12000 – 15000
Вентиляторные установки	0 – 5000
Насосные агрегаты	6500 – 7500 10000 – 12000

Заключение

Выполненный в работе анализ вероятности безотказной работы ЭМ в алмазодобывающей промышленности методом множительных оценок Каплана-Мейера, позволил определить как наиболее дефектную марку электродвигателей в системе, так и выделить дефектные узлы в определённом электродвигателе. Благодаря тому, что метод нацелен на обработку как полных, так и цензурированных данных, массив данных был достаточно большим, что дало возможность получить более точные результаты.

В ходе исследования были получены следующие результаты. Из представленных трёх производственных объектов (рудник «Мир», рудник «Интернациональный» и обогатительная фабрика №3) наиболее подвержено отказам оборудование на руднике «Мир» о чём говорит резкий спад после 6000 часов эксплуатации с вероятностью доработки до 30000 часов - 11%. В качестве исследуемых объектов на руднике «Мир»

были рассмотрены вентиляторные установки, насосы и проходческие комбайны марок AM-75 и AM-105. В результате было выявлено, что самой низкой вероятностью безотказной работы обладает проходческий комбайн марки AM-75, что заметно по интенсивному спаду кривой безотказности спустя 5000 часов на графике по сравнению с остальным оборудованием с вероятностью доработки до 15000 часов - 11%. Далее были проанализированы отказы рабочих органов проходческого комбайна AM-75. Анализ показал, что режущий орган комбайна имеет меньшую вероятность безотказной работы, где вероятность доработки до 15000 часов - 1%. Используемый метод анализа также помог определить наиболее подверженный дефектам узел ЭМ режущего органа комбайна AM-75, им является подшипниковый узел. Его критическим временем является период с 5000 до 10000 часов с вероятностью доработки до 15000 - 15%. Исходя из полученных результатов, была составлена таблица критических периодов времени электрооборудования рудника «Мир» (табл. 2).

Знание о критическом времени оборудования позволит не только повысить эффективность графиков технического обслуживания и ремонта, но и прогнозировать наибольший риск выхода из строя в определённых интервалах времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков, В. П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: Питер, 2003. - 688 с.
2. Халафян, А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. Учебник - М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. - 512 с.
3. Ardo van den Hout. Multi-state survival models for interval - censored data. - CRC Press, 2017. - 238 p.
4. Handbook of survival analysis // John P. Klein, Hans C. van Houwelingen, Joseph G. Ibrahim, Thomas H. Scheike. - CRC Press, 2014. - 632 p.
5. Боровиков, В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA: Учебное пособие для вузов / Боровиков В.П. - М.: Горячая линия - Телеком, 2013. - 288 с.
6. Халафян, А.А. Промышленная статистика: Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA. - М.: Либроком, 2013. - 384 с.
7. Shevchuk, V. A.. Survival analysis of A.C. machines in the diamond industry using the Kaplan-Meier estimator [Электронный ресурс] / Shevchuk V. A., Muravlev O. P., Stolyarova O. O. // MATEC Web Conferences. - 2017. - V. 141. DOI:

<https://doi.org/10.1051/mateconf/201714101033> - (Дата обращения: 27.04.2018).

8. Shevchuk, V. A. The use of a special software for induction motor diagnostics in the diamond industry [Электронный ресурс] / Shevchuk V. A., Muravlev O. P., Stolyarova O. O., Shevchuk V. P. // MATEC Web Conferences. - 2017. - Volume 91. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179101033> - (Дата обращения: 27.04.2018).
9. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2016. - 24 с.
10. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures, 4 (2015)
11. Liu, Xian. Survival Analysis. Models and Applications. - Higher Education Press, 2012. - 446 p.
12. Van den Hout A. Multi-State Survival Models for Interval-Censored Data. - Boca Raton: CRC Press, 2016. - 257 p.
13. Moore, Dirk F. Applied Survival Analysis Using R. - New York: Springer, 2016. - 234 p.
14. Crowder, M.J. Multivariate Survival Analysis and Competing Risks. - Chapman and Hall/CRC, 2012. - 417 p.
15. Wienke, A. Frailty Models in Survival Analysis. - Chapman and Hall/CRC, 2010. - 312 p.

Vladislav A. Shevchuk¹, Postgraduate Student, Oleg P. Muravlev¹, Dr. Sc. in Engineering, Professor

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30

E-mail: vashevchuk@tpu.ru

ANALYSIS OF FAILURE-FREE OPERATION PROBABILITY FOR ELECTRICAL MACHINES IN THE DIAMOND INDUSTRY

Abstract: The urgency of the discussed issue. Electric drives used for mining equipment in diamond mining industry are "critical" because the efficiency of the entire diamond mining complex largely depends on their reliability. Failures and unplanned shutdowns of equipment even for a short time lead to loss of income and time, additional costs for repairs, and also jeopardize the safety of personnel and can sometimes lead to industrial disasters. Early diagnostics and repair using modern technologies minimize downtime and eliminate sudden failures.

The main aim of the study. To determine critical time of the failure-free operation probability and the most vulnerable assemblies of electric machine groups used in the diamond industry, using the Kaplan-Meier multiplier method.

The methods used in the study. Statistical methods for determining the quantification of operational reliability indicators.

The results. The authors obtain data of the failure-free operation probability of mining equipment for different time intervals in graph and tabular forms. Critical time intervals of electrical equipment are determined and also the most defective assemblies are identified. Such data is necessary for increasing the efficiency of preventative maintenance and predicting the electric machines state in diamond industry.

Keywords: diamond industry, probability of failure-free operation, survival, statistic, Kaplan-Meier estimator.

Article info: received August 05, 2018

DOI: 10.26730/1816-4528-2018-4-39-45

REFERENCES

1. Borovikov V. P., STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере [STATISTICA. The art of

analyzing data on a computer]. Saint-Petersburg, Piter, 2003. 688 P.

2. Halafyan A. A., STATISTICA 6. Statisticheskii analiz dannyh. Uchebnik [STATISTICA 6. Sta-

tistical analysis of data. Textbook]. Moscow, «Binom-Press», 2007. 512 P.

3. Ardo van den Hout. Multi-state survival models for interval - censored data. CRC Press, 2017. 238 P.

4. John P. Klein, Hans C. van Houwelingen, Joseph G. Ibrahim, Thomas H. Scheike, Handbook of survival analysis. CRC Press, 2014. 632 P.

5. Borovikov V.P., Populyarnoe vvedenie v sovremennyy analiz dannyh v sisteme STATISTICA: Uchebnoe posobie dlya vuzov [A popular introduction to modern data analysis in the STATISTICA system: A Textbook for Universities]. Moscow: Goryachaya liniya Telekom, 2013. 288 P.

6. Halafyan A.A., Promyshlennaya statistika: Kontrol' kachestva, analiz protsessov, planirovanie eksperimentov v pakete STATISTICA [Industrial statistics: Quality control, process analysis, experiment planning in the STATISTICA package]. Moscow: Librokom, 2013. 384 P.

7. Shevchuk V. A., Muravlev O. P., Stolyarova O. O. MATEC Web Conferences, 141 (2017): 1-4 doi: 10.1051/matecconf/201714101033

8. Shevchuk V. A., Muravlev O. P., Stolyarova O. O., Shevchuk V. P., MATEC Web Conferences, 91 (2017): 1-4 doi:10.1051/matecconf/20179101033

9. GOST 27.002-2015. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [Reliability in technology. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform, 2016. 24 p.

10. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures, 4 (2015).

11. Liu, Xian. Survival Analysis. Models and Applications. Higher Education Press, 2012. 446 p.

12. Van den Hout A. Multi-State Survival Models for Interval-Censored Data. - Boca Raton: CRC Press, 2016. 257 p.

13. Moore, Dirk F. Applied Survival Analysis Using R. New York: Springer, 2016. 234 p.

14. Crowder, M.J. Multivariate Survival Analysis and Competing Risks. Chapman and Hall/CRC, 2012. 417 p.

15. Wienke, A. Frailty Models in Survival Analysis. Chapman and Hall/CRC, 2010. 312 p.

Библиографическое описание статьи

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. 39-45.

Reference to article

Shevchuk V.A., Muravlev O.P. Analysis of failure-free operation probability for electrical machines in the diamond industry. Mining Equipment and Electromechanics, 2018, no. 4 (138), pp. 39-45.