

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НАСОСОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Я.А. Тынченко^{1,3}, В.В. Кукарцев^{1,2,3}, К.А. Башмур¹, Xiaogang Wu⁴, Н.С. Севрюгина⁵

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,
e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru

² Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

³ Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁴ Хэбэйский технологический университет, Тяньцзинь, Китай

⁵ Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

Аннотация: В условиях механизации и автоматизации возрастает актуальность повышения надежности работы оборудования. Оценка показателей риска эксплуатации насосов осуществляется с использованием модели, называемой «деревом событий». Из-за ограниченности информации результаты вероятностного анализа безопасности характеризуются высокой степенью неопределенности. Для сбора информации о состоянии горных машин и оборудования используются бортовые журналы, электронные таблицы и специализированное программное обеспечение по типу системы SAP Plant Maintenance (SAP PM). Сбор, обработка и анализ статистической информации об отказах позволяет установить закономерности возникновения отказов работы горных машин и оборудования, наработку узлов и агрегатов и др. Обоснован алгоритм вероятностного анализа безопасности насосов с применением искусственного интеллекта. Показано, что прогнозирование безотказной работы с помощью нейронной сети позволяет уточнить техническое состояние насосов. Определены показатели надежности крупного синхронного двигателя насосного агрегата насосной станции с учетом возможного превышения температуры обмотки в режиме перегрузки. Выявлено, что при превышении температуры обмоток двигателя вероятность безотказной работы уменьшается на 10%. Оптимизирована конструкция инструментов для выявления отказов элементов крупных насосов в горнодобывающей промышленности с учетом режимов эксплуатации.

Ключевые слова: надежность, риск, анализ, безопасность, насосы, нейронная сеть, двигатель, безотказная работа, искусственный интеллект.

Для цитирования: Тынченко Я. А., Кукарцев В. В., Башмур К. А., Xiaogang Wu, Севрюгина Н. С. Вероятностный анализ показателей надежности насосов с помощью нейронной сети // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 126–136. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_126.

Probabilistic analysis of pump reliability indicators using a neural network

Yadviga A. Tynchenko^{1,3}, V.V. Kukartsev^{1,2,3}, K.A. Bashmur¹,
Xiaogang Wu⁴, N.S. Sevryugina⁵

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow Russia

⁴ Hebei University of Technology, Tianjin, China

⁵ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Abstract: In the conditions of mechanization and automation, the urgency of the problem of increasing the reliability of the equipment is increasing. Evaluation of indicators of the risk of operation of pumps is carried out using a model called «event tree». Because of the limited information, the results of probabilistic security analysis are characterized by a high degree of uncertainty. To collect information about the condition of mining machines and equipment, on-board logs, electronic tables and specialized software such as the SAP Plant Maintenance (SAP PM) system are used. Collection, processing and analysis of statistical information about failures allows to establish patterns of failure of mining machines and equipment, working units and aggregates, etc. Based on the algorithm of probabilistic analysis of the safety of pumps with the use of artificial intelligence. It is shown that the prediction of error-free operation with the help of a neural network allows to specify the technical condition of pumps. Determined reliability indicators of the large synchronous motor of the pumping unit of the pumping station, taking into account the possible excess temperature of the winding in the overload mode. In the work, it was revealed that when the temperature of the motor windings is exceeded, the probability of error-free operation decreases by 10%. Optimized design of tools for identifying failures of elements of large pumps in the mining industry taking into account operating modes.

Key words: reliability, risk, analysis, safety, pumps, neural network, engine, unanswered work, artificial intelligence.

For citation: Tynchenko Ya. A., Kukartsev V. V., Bashmur K. A., Xiaogang Wu, Sevryugin N. S. Probabilistic analysis of pump reliability indicators using a neural network. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):126-136. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_126.

Введение

Тройные поршневые диафрагменные насосы одностороннего действия широко используются в добывающей промышленности. В горной промышленности они применяются для перекачивания агрессивных и вязких жидкостей, а также для работы в условиях высокого давления [1, 2]. Эти насосы состоят из трех поршней, которые двигаются вверх и вниз внутри цилиндра. Поршни приво-

дятся в движение с помощью гидравлического или механического привода. Диафрагменные насосы обеспечивают высокую эффективность и надежность в работе. Основное преимущество тройных поршневых диафрагменных насосов в горной промышленности заключается в их способности обеспечивать стабильную подачу жидкости даже при высоких давлениях и вязкостях. Также они обладают долгим сроком службы и

могут работать в тяжелых условиях, что делает их идеальным выбором для использования в горнодобывающей промышленности [3, 4]. В силу своей длительной работы они требуют периодической проверки. Данная проверка связана с остановкой работы, поэтому применение систем непрерывного мониторинга без остановки работы может дать существенное сокращение времени простоев. Ожидаемое сокращение времени простоя при использовании системы мониторинга насосов – 15%.

Основанием для оценки надежности работы эксплуатируемого оборудования являются статистические данные [5 – 7].

Цель данного исследования – разработка методики прогнозирования безотказного функционирования с помощью нейронной сети, которая позволяла бы уточнять техническое состояние используемых горной промышленностью насосов.

Методология

Для оценки состояния механизма используется теория нечетких множеств [8], «дерево отказов», причинно-следственная диаграмма Исикавы, факторный анализ и т.д. Нормальная эксплуатация элементов насоса нарушается при непредвиденном изменении режима его работы [9, 10].

Статистическая информация об отказах и фактическом техническом состоянии оборудования формируется рабочими документами:

- рабочими журналами;
- электронными таблицами;
- специализированным программным обеспечением [11].

При построении математических моделей используют методы теории вероятности и математической статистики.

На рис. 1 и 2 показаны различные существующие виды отказов насоса. Эти причины могут быть взаимосвязаны, вызывая друг друга. Например, механические неисправности могут привести к электрическим неисправностям, а электрические неисправности – к гидравлическим. Неправильная эксплуатация может усугубить механические неисправности, а внешние факторы могут ускорить износ и коррозию компонентов насоса. Понимание логических связей между различными причинами нарушений режимов работы насосов имеет важное значение для эффективного устранения неполадок и предотвращения будущих отказов. При диагностике проблем с насосом необходимо учитывать возможные взаимосвязи между различными причинами и принимать соответствующие меры для устранения основной причины неисправности.



Рис. 1. Поводы для отказа насоса

Fig. 1. Reasons for pump failure



Рис. 2. Исходные события нарушений режима работы насоса

Fig. 2. Initial events of pump operation violations

Результаты

Безотказная работа насосов $P_{12}(t) - P_{19}(t)$ может быть обеспечена нейронами $S_{12} - S_{19}$. В этом случае выходом этих нейронов будут сигналы $X_{12} \dots X_{19}$. Эти сигналы будут соответствовать сигналам синапсов биологического нейрона. Они умножаются на вес $W_{12} \dots W_{19}$, после чего эти сигналы приходят на вход нейрона отказа. Нейрон S_{H1} суммирует входы, создавая выход NET :

$$NET_{H1} = X_{H1} W_{H1}. \quad (1)$$

Показателем надежности крупного синхронного двигателя (СД) является вероятность его безотказной работы с учетом температуры обмотки в режиме перегрузки.

Система надежности [12 – 14] крупных синхронных двигателей насосных агрегатов зависит от качественного снабжения потребителей электроэнергией.

На надежность крупных СД насосных агрегатов действуют такие факторы, как превышение температуры активных частей СД, температура охлаждающей и окружающей среды, удары и вибрация установок и др. Эти факторы возникают в системе «СД – насос» в процессе пуска, во время работы в режиме пере-

грузки, повышения и понижения напряжения сети, а также при нестационарных процессах в горнодобывающей промышленности [15].

При эксплуатации СД в результате нагрева и охлаждения обмоток возникают термомеханические нагрузки, которые сокращают срок их службы.

Влияние увеличения превышения температуры обмоток в режиме перегрузки на надежность СД определяется в следующей последовательности. Выявляется зависимость срока службы СД от превышения температуры ее обмоток. Срок службы изоляции обмоток электрических машин определяется правилом «восемь градусов» [16] с учетом кинетики химических реакций, влияющая температура, влажности и агрессивных сред [17], а также прочих факторов [18, 19].

Рекомендован упрощенный метод определения влияния перегрузок на срок службы изоляции.

Продолжительность нахождения обмоток статора СД в перегретом состоянии

$$f(t) = \Delta(\Delta v), \quad (2)$$

где $\Delta(\Delta v)$ – увеличение превышения температуры обмотки статора больше номинальной ее величины.

С использованием выражения износа нагрева и охлаждения $z_{\text{охла}}$ в перегретом режиме определен общий износ изоляции в режиме перегрузки; износ за остальное время года, общий износ за год, после чего определен износ без перегрева.

Срок службы изоляции ξ_1 с учетом перегрева

$$\xi_1 = \frac{1}{z_1 + z_2} \quad (3)$$

и срок службы изоляции $\xi_{\text{н}}$ при отсутствии перегревов –

$$\xi_{\text{н}} = 1/z_{\text{ном}}, \quad (4)$$

где z_1 – износ изоляции в режиме перегрузки; z_2 – износ изоляции за остальное время года, не в режиме перегрузки; $z_{\text{ном}}$ – общий (номинальный) износ изоляции за год.

При исследовании надежности использован статистический метод [19, 20].

Вычислен статистический ряд, например, средняя наработка синхронного двигателя на отказ за год

$$T_o = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (5)$$

где t_i – время работы СД между $(i-1)$ и i отказами, ч; n – количество происшедших отказов.

Построена гистограмма и определена статистическая функция плотности распределения $f(t)$, определен наиболее близкий из теоретических законов распределения [20 – 22].

Корректность полученного результата проверена расчетом с помощью критериев хи-квадрата Пирсона и А.Н. Колмогорова.

Результаты исследований показали, что время безотказной работы СД насосных агрегатов насосной станции (НС) подчиняется экспоненциальному закону [23, 24]

$$P_o(t) = e^{-\frac{t}{T_o}}. \quad (6)$$

Для определения вероятности безотказной работы СД с учетом влияния превышения температур обмоток вводится коэффициент нагрузки

$$k_{\text{н}} = \frac{\xi_1}{\xi_{\text{н}}}. \quad (7)$$

Здесь ξ_1 находится из выражения (3) с учетом перегревов, а $\xi_{\text{н}}$ – из (4), без их учета.

Таким образом, вероятность безотказной работы СД с учетом увеличения превышения температуры обмотки в режиме перегрузки равна

$$P'_o(t) = e^{-\frac{t}{k_{\text{н}}T_o}}. \quad (8)$$

Обсуждение результатов

Разработанная математическая модель реализована для синхронных двигателей насосных агрегатов насосной станции.

На рис. 3 показан график превышения температуры обмоток на примере СД насосного агрегата № 3, а изменение графика превышения температуры конкретного периода имеет ступенчатый характер; чередование графиков нагрева обмотки статора $(\Delta(\Delta v)^{\text{н}})$ и охлаждения $(\Delta(\Delta v)^{\text{о}})$ не имеет определенной последовательности. Это связано с тем, что на нагрев обмоток влияют различные факторы, такие как нагрузка двигателя, температура окружающей среды, состояние системы охлаждения, возраст изоляции обмоток. Когда двигатель работает под высокой нагрузкой, температура обмоток повышается. Когда нагрузка снижается, температура обмоток начинает снижаться. Однако скорость, с которой охлаждаются обмотки, зависит от эффективности системы охлаждения и возраста изоляции обмоток.

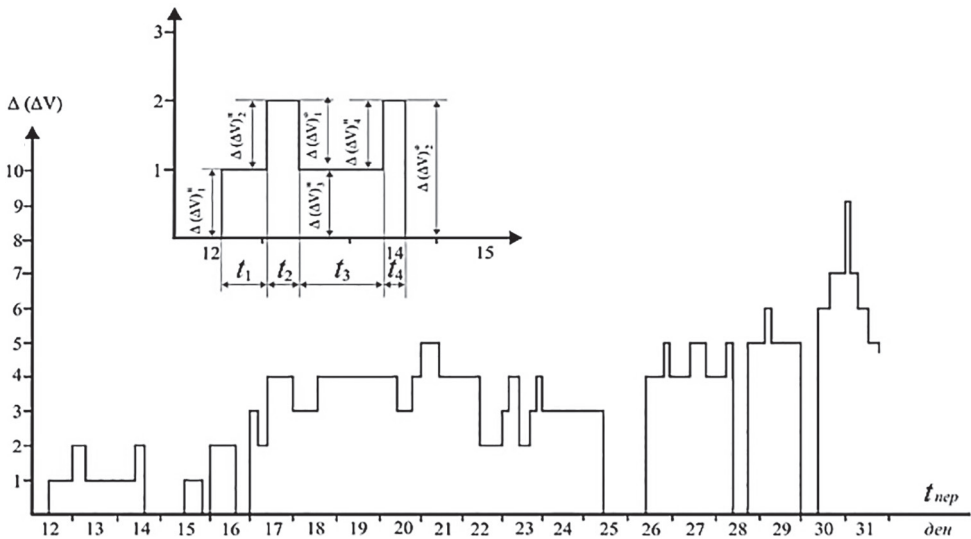


Рис. 3. График превышения температуры обмоток $\Delta(\Delta v) = f(t_{nep})$ СД-3 НС
 Fig. 3. Graph of temperature rise of windings $\Delta(\Delta v) = f(t_{nep})$ of SD-3 NS

Изоляция обмоток со временем стареет и становится менее эффективной в рассеивании тепла. Это означает, что обмоткам требуется больше времени для охлаждения после того, как нагрузка снизится. Это приводит к ступенчатому характеру графика превышения температуры. Поэтому при определении износа изоляции учитываются графики

нагрева и охлаждения оборудования за различные годы тренда.

По результатам расчетов на основе выражений (6) – (8) построены кривые вероятности безотказной работы $P_o(t)$ и $P'_o(t)$ (рис. 4). Из рис. 4 следует, что превышение температуры обмоток двигателя уменьшает вероятность его безотказной работы на величину до 10%.

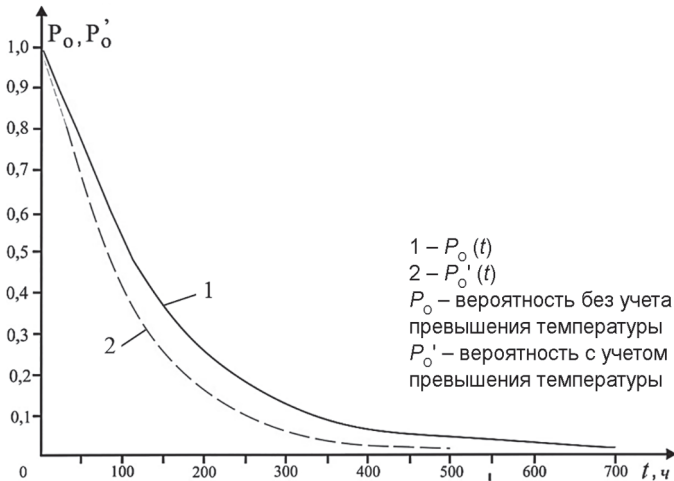


Рис. 4. Кривые вероятности безотказной работы СД-3 НС
 Fig. 4. Failure probability curves SD-3 NS

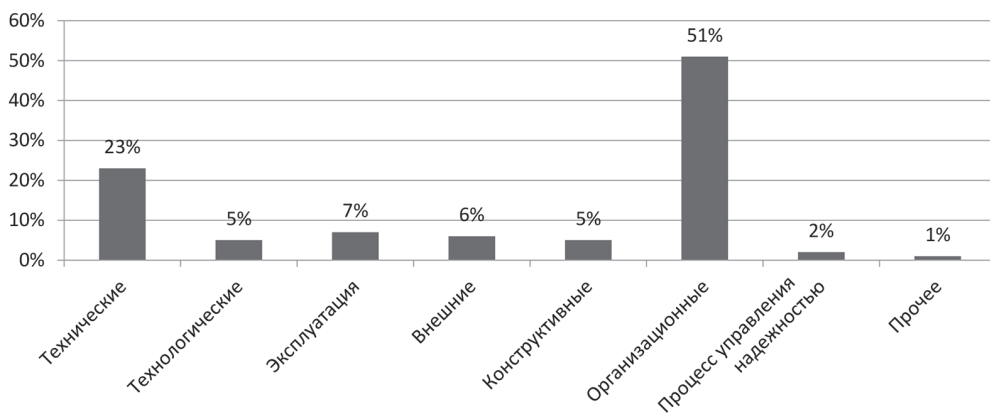


Рис. 5. Диаграмма, показывающая общие причины возникновения отказов
 Fig. 5. Diagram showing common causes of failure

Результаты исследования позволяют уточнить пределы наработки на отказ. Проанализировав причины отказа насосов, можно сделать следующие заключения:

- неисправности обнаруживаются чаще всего в механической части (14%) и электрооборудовании (11%);
- организационные причины превышают половину общего числа отказов (рис. 5);
- пик отказов приходится на летний период.

Результаты исследования открывают перспективу использования исходных данных после обработки их нейронными сетями с целью предиктивной аналитики с прогнозированием вероятных отказов элементов машин.

Нейронная сеть со временем самосовершенствуется [18, 19]. Принятие трансформационных решений на основе экспериментальных данных повышает их качество и создает условия для использования коллективных компетенций и информационного обмена.

Заключение

Прогнозирование безотказной работы с помощью нейронной сети позволяет уточнить техническое состояние насосов. При превышении температуры обмоток двигателя вероятность безотказной работы уменьшается на 10%.

Использование результатов исследования открывает предприятиям доступ к инструментам анализа собственными силами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филина О. А., Талипов Р. Э., Назипов Н. М. Классификация систем технического диагностирования и средств технического диагностирования // Научный альманах. — 2022. — № 11-3(97). — С. 83–86.
2. Abdi Yonis S., Yusupov Z., Habbal A., Toirov O. Control approach of a grid connected DFIG based wind turbine using MPPT and PI controller // Advances in Electrical and Electronic Engineering. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 455–462. DOI: 10.15598/aeec.v21i3.5149.
3. Овчинников Н. П. Оценка степени влияния твердой фазы шахтных вод на долговечность узла гидравлической пяты секционного насоса главной водоотливной установки рудника «Удачный» // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 494–500. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-494-500.

4. Litvinenko R., Auhadeev A., Khusnutdinov A., Antipanova I., Kisneeva L. An approach to determining the integrated reliability of technical systems at the development stage / International Symposium: Sustainable Energy and Power Engineering. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2021, pp. 83–94.
5. Filina O. A., Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Bashmur K. A., Pavlov P. P., Panfilova T. A. Increasing the efficiency of diagnostics in the brush-commutator assembly of a direct current electric motor // *Energies*. 2024, vol. 17, no. 1, article 0017. DOI: 10.3390/en17010017.
6. Toirov O., Jumaeva D., Mirkhonov U., Urokov S., Ergashev Sh. Frequency-controlled asynchronous electric drives and their energy parameters // *AIP Conference Proceedings*. 2023, vol. 2552, article 040021. DOI: 10.1063/5.0111331.
7. Баловцев С. В., Меркулова А. М. Комплексная оценка надежности зданий, сооружений и технических устройств горных предприятий // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 3. – С. 170–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.
8. Toirov O., Alimkhodjaev K., Pardaboev A. Analysis and ways of reducing electricity losses in the electric power systems of industrial enterprises // *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 288, article 01085. DOI:10.1051/e3sconf/202128801085.
9. Toirov O., Khalikov S. Algorithm and software implementation of the diagnostic system for the technical condition of powerful units // *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 377, article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202337701004.
10. Мендебаяв Т. Н., Смашов Н. Ж. Многокамерная забойная гидромашина роторного типа для бурения скважин // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 303–309. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-303-309.
11. Зиновьева О. М., Смирнова Н. А. К вопросу оценки надежности технических устройств на горных предприятиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 1. – С. 157–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.
12. Pavlov P., Butakov V., Khusnutdinov A., Abdullina A., Snezhinskay E., Cherepenkin I. Fault isolation in digital instruments and devices used in power-engineering systems / International Symposium: Sustainable Energy and Power Engineering Singapore: Springer Nature Singapore. – 2021, pp. 169–177.
13. Isametova M. E., Nussipali R., Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Efremkov E. A., Isametov A. Mathematical modeling of the reliability of polymer composite materials // *Mathematics*. 2022, vol. 10, no. 21, article 3978. DOI: 10.3390/math10213978.
14. Воронин В. А., Непша Ф. С., Ермаков А. Н., Кантович Л. И. Анализ режимов работы электротехнического оборудования выемочного участка современной угольной шахты // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2021. – Т. 13. – № 4. – С. 599–607. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-599-607.
15. Рахмилевич З. З. Насосы в химической промышленности. Справочное издание. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
16. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport // *Mathematics*. 2023, vol. 11, no. 15, article 3317. DOI: 10.3390/math11153317.
17. Краснов В. И., Жильцов А. М., Набержнев В. В. Ремонт центробежных и поршневых насосов нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. Справочник. – М.: Химия, 1996. – 320 с.
18. Байков И. Р., Смородов Е. А., Ахмадуллин К. Р. Методы анализа надежности и эффективности систем добычи и транспорта углеводородного сырья. – М.: ООО «Недра Бизнесцентр», 2003. – 275 с.
19. Савинцева Ю. И., Потеряхин Д. И., Хазиев Р. А., Шипунова Т. В. Основные принципы безопасной эксплуатации центробежных насосов // *Евразийский Союз Ученых*. – 2016. – № 1. – С. 22.
20. Волков А. В., Парыгин А. Г., Хованов Г. П., Наумов А. В. Повышение эффективности работы центробежных насосов, находящихся в эксплуатации // *Новости теплоснабжения*. – 2010. – № 10. – С. 122.
21. Маркин А. В., Полесский С. Н., Жаднов В. В. Методы оценки надежности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования // *Надежность*. – 2010. – № 2. – С. 63–70.

22. Жаднов В. В. Методы и средства оценки показателей надежности механических и электромеханических приборов и систем // Датчики и системы. – 2013. – № 4. – С. 15 – 20.
23. Zhadnov V. Methods and means of the estimation of indicators of reliability of mechanical and electromechanical elements of devices and systems // Reliability: Theory & Applications. 2011, vol. 2, no. 4, pp. 94 – 102.
24. Портнягин А. Л., Соловьев И. Г. Модель оценки остаточного ресурса погружного оборудования // Вестник кибернетики. – 2002. – № 1. – С. 103 – 108. **VIAB**

REFERENCES

1. Filina O. A., Talipov R. E., Nazipov N. M. Classification of technical diagnostic systems and technical diagnostic tools. *Scientific almanac*. 2022, no. 11-3(97), pp. 83 – 86. [In Russ].
2. Abdi Yonis S., Yusupov Z., Habbal A., Toirov O. Control approach of a grid connected DFIG based wind turbine using MPPT and PI controller. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 455 – 462. DOI: 10.15598/aeec.v21i3.5149.
3. Ovchinnikov N. P. Assessment of the degree of influence of the solid phase of mine water on the durability of the hydraulic foot assembly of the sectional pump of the main drainage plant of the Udachny mine. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 494 – 500. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-494-500.
4. Litvinenko R., Auhadeev A., Khusnutdinov A., Antipanova I., Kisneeva L. An approach to determining the integrated reliability of technical systems at the development stage. *International Symposium: Sustainable Energy and Power Engineering*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2021, pp. 83 – 94.
5. Filina O. A., Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Bashmur K. A., Pavlov P. P., Panfilova T. A. Increasing the efficiency of diagnostics in the brush-commutator assembly of a direct current electric motor. *Energies*. 2024, vol. 17, no. 1, article 0017. DOI: 10.3390/en17010017.
6. Toirov O., Jumaeva D., Mirkhonov U., Urokov S., Ergashev Sh. Frequency-controlled asynchronous electric drives and their energy parameters. *AIP Conference Proceedings*. 2023, vol. 2552, article 040021. DOI: 10.1063/5.0111331.
7. Balovtsev S. V., Merkulova A. M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 3, pp. 170 – 181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.
8. Toirov O., Alimkhodjaev K., Pardaboev A. Analysis and ways of reducing electricity losses in the electric power systems of industrial enterprises. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 288, article 01085. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801085.
9. Toirov O., Khalikov S. Algorithm and software implementation of the diagnostic system for the technical condition of powerful units. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 377, article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202337701004.
10. Mendebayev T. N., Smashov N. Zh. Multi-chamber downhole hydraulic machine of rotary type for wells drilling. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 303 – 309. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-303-309.
11. Zinovieva O. M., Smirnova N. A. On the issue of assessing the reliability of technical devices at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 1, pp. 157 – 168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.
12. Pavlov P., Butakov V., Khusnutdinov A., Abdullina A., Snezhinskay E., Cherepenkin I. Fault isolation in digital instruments and devices used in power-engineering systems. *International Symposium: Sustainable Energy and Power Engineering Singapore*. Springer Nature Singapore. 2021, pp. 169 – 177.
13. Isametova M. E., Nussipali R., Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Efremenkov E. A., Isametov A. Mathematical modeling of the reliability of polymer composite materials. *Mathematics*. 2022, vol. 10, no. 21, article 3978. DOI: 10.3390/math10213978.
14. Voronin V. A., Nepsha F. S., Ermakov A. N., Kantovich L. I. Analysis of electrical equipment operating modes of the excavation site of a modern coal mine. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 599 – 607. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-599-607.
15. Rakhmilevich Z. Z. *Nasosy v khimicheskoy promyshlennosti*. Spravochnoe izdanie [Pump in the chemical industry. Reference edition], Moscow, Khimiya, 1990, 240 p.

16. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport. *Mathematics*. 2023, vol. 11, no. 15, article 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

17. Krasnov V. I., Zhil'tsov A. M., Naberzhnev V. V. *Remont tsentrobeznykh i porshnevnykh nasosov neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh predpriyatiy*. Spravochnik [Repair of centrifugal and piston pumps of oil refining and petrochemical enterprises. Directory], Moscow, Khimiya, 1996, 320 p.

18. Baykov I. R., Smorodov E. A., Akhmadullin K. R. *Metody analiza nadezhnosti i effektivnosti sistem dobychi i transporta uglevodorodnogo syr'ya* [Method of analysis of reliability and efficiency of production and transportation of hydrocarbon raw materials], Moscow, ООО «Nedra Biznestsentr», 2003, 275 p.

19. Savintseva Yu. I., Poteryakhin D. I., Khaziev R. A., Shipunova T. V. The main principle of safe operation of centrifugal pumps. *Evrasiyskiy Soyuz Uchenykh*. 2016, no. 1, pp. 22. [In Russ].

20. Volkov A. V., Parygin A. G., Khovanov G. P., Naumov A. V. Increasing efficiency of operation of centrifugal pumps in operation. *Novosti teplosnabzheniya*. 2010, no. 10, pp. 122. [In Russ].

21. Markin A. V., Polesky S. N., Zhadnov V. V. The method of reliability assessment of mechanical and electromechanical elements of electronic means at the early stages of design. *Reliability*. 2010, no. 2, pp. 63–70. [In Russ].

22. Zhadnov V. V. Methods and tools for evaluating reliability indicators of mechanical and electromechanical devices and systems. *Sensors and systems*. 2013, no. 4, pp. 15–20. [In Russ].

23. Zhadnov V. Methods and means of the estimation of indicators of reliability of mechanical and electromechanical elements of devices and systems. *Reliability: Theory & Applications*. 2011, vol. 2, no. 4, pp. 94–102.

24. Portnyagin A. L., Soloviev I. G. Model evaluation of the residual resource of submersible equipment. *Vestnik cybernetics*. 2002, no. 1, pp. 103–108. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тынченко Ядвига Александровна¹ — МГТУ им. Н.Э. Баумана,
e-mail: t080801@yandex.ru,

Кукарцев Владислав Викторович^{1,2} — канд. техн. наук,
доцент, НОЦ Технологии искусственного интеллекта
МГТУ им. Н.Э. Баумана,

e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru,
ResearcherID: U-6956-2019,
Scopus Author ID: 57202283852,
SPIN-код: 3522-2910,
ORCID ID: 0000-0001-6382-1736,

Башмур Кирилл Александрович¹ — старший преподаватель,
Xiaogang Wu — Школа электротехники,
Хэбэйский технологический университет,
Тяньцзинь, Китай, e-mail: xgwu@hrbust.edu.cn,
ORCID ID: 0000-0002-1830-0437,

Северюгина Надежда Савельевна — д-р техн. наук,
профессор, Институт механики и энергетики
имени В.П. Горячкина, Российский государственный
аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева,
e-mail: nssevr@yandex.ru, Researcher ID: M-2198-2015,
Scopus Author ID: 56426993600, SPIN-код: 4444-0443,
ORCID ID: 0000-0002-3494-1437.

¹ Сибирский федеральный университет,

² Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М.Ф. Решетнёва.

Для контактов: Кукарцев В.В., e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Yadviga A. Tynchenko*¹, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia, e-mail: t080801@yandex.ru,
V.V. Kukartsev^{1,2}, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Artificial Intelligence Technology Scientific and Education Center, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru, Researcher ID: U-6956-2019, Scopus Author ID: 57202283852, SPIN-code: 3522-2910, ORCID ID: 0000-0001-6382-1736,
*K.A. Bashmur*¹, Senior Lecturer, *Xiaogang Wu*, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China, e-mail: xgwu@hrbust.edu.cn, ORCID ID: 0000-0002-1830-0437,
N.S. Sevryugina, Dr. Sci. (Eng.), Professor, V.P. Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 127550, Moscow, Russia, e-mail: nssevr@yandex.ru, Researcher ID: M-2198-2015, Scopus Author ID: 56426993600, SPIN-code: 4444-0443, ORCID ID: 0000-0002-3494-1437.

¹ Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia,

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russia.

Corresponding author: V.V. Kukartsev, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru.

Получена редакцией 15.04.2024; получена после рецензии 13.05.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 15.04.2024; received after the review 13.05.2024; accepted for printing 10.06.2024.

