

ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Е. А. Александров✉

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
г. Москва, Российская Федерация
✉ swat94@inbox.ru*

Аннотация. Описаны возможные условия применения и отличительные особенности водоотливных установок при строительстве подземной части метрополитена. Определены наиболее частые причины снижения характеристик или выхода из строя насосного оборудования: засор насоса, неисправности подшипников, утечки из-за дефектов уплотнений, а также серьезные неисправности, требующие замены (прогорание статора или повреждение крыльчатки насоса). Рассмотрена возможность применения системы мониторинга по фактическому состоянию, которая будет применима к основным группам неисправностей, возникающих во время эксплуатации насосного оборудования. Приведен обзор основных существующих и перспективных видов мониторинга водоотливных систем и существующих коммерческих электронных блоков управления насосными системами, как то: спектральный анализ токов приводного асинхронного двигателя; установка датчиков основных выходных параметров насоса (давление, расход жидкости); спектральный анализ и общий уровень вибрации гидравлической и электрической части насоса; применение анализатора межвиткового короткого замыкания; методы обнаружения кавитации в насосе (регистрация механических колебаний, высокочастотных пульсация давления, акустических шумов и визуальных образов), а также возможность применения крупных вибромониторинговых систем на основе машинного обучения и нечеткой логики. Приведены рекомендации о возможности применения вышеприведенных мониторинговых систем.

Ключевые слова: метрополитен, строительство, насос, водоотливная установка, кавитация, спектральный анализ, вибромониторинг, межвитковое короткое замыкание, машинное обучение, датчик давления, асинхронный двигатель

Благодарности, признательность, финансирование: автор выражает благодарность коллективам ООО «ТО-6 Метростроя» и ООО «СМУ-8 Метростроя» за плодотворную совместную работу.

Для цитирования: Александров ЕА. Обзор перспективных систем мониторинга водоотливных установок при строительстве подземной части метрополитена. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(2):19-25. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-19-25>.

REVIEW OF PROMISING MONITORING SYSTEMS FOR DRAINAGE INSTALLATIONS IN THE CONSTRUCTION OF THE UNDERGROUND PART OF THE METRO

E. A. Aleksandrov✉

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National University of Science
and Technology MISiS», Moscow, Russian Federation
✉ swat94@inbox.ru*

Abstract. The article describes the possible conditions for the application and distinctive features of drainage installations during the construction of the underground part of the metro. The most common causes of performance degradation or failure of pumping equipment are identified, including pump clogging, bearing failures, leaks due to seal defects, as well as severe malfunctions requiring replacement (stator burnout or impeller damage). The feasibility of implementing a condition-based monitoring system applicable to the main groups of failures occurring during the operation of pumping equipment is considered. A review of existing and prospective

monitoring methods for drainage systems and commercially available electronic pump control units is provided, including: spectral analysis of currents in the drive induction motor, installation of sensors for key pump output parameters (pressure, fluid flow rate), spectral analysis and overall vibration level of the hydraulic and electrical components of the pump, use of an interturn short circuit analyzer, methods for detecting cavitation in the pump (registration of mechanical vibrations, high-frequency pressure pulsations, acoustic noise, and visual patterns), as well as the potential application of large-scale vibration monitoring systems based on machine learning and fuzzy logic. Recommendations are provided regarding the feasibility of applying such monitoring systems.

Keywords: subway, construction, pump, drainage system, cavitation, spectral analysis, vibration monitoring, inter-turn short circuit, machine learning, pressure sensor, asynchronous motor

Acknowledgments, funding, financial Support: The author expresses gratitude to the teams of LLC «TO-6 Metrostroy» and LLC «SMU-8 Metrostroy» for their fruitful collaboration.

For citation: Aleksandrov EA. Review of promising monitoring systems for drainage installations in the construction of the underground part of the metro. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(2):19-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-19-25>.

Введение

Центробежные лопастные машины и сопутствующая им инфраструктура (водоотлив) при строительстве подземных сооружений имеет свои особенности.

При строительстве метрополитена насосы используются как вспомогательные машины в обслуживающих процессах, обеспечивающие непрерывность технологического процесса проходки. Это основная элементная цепочка проходческих работ при проходке стволов. Кроме того, насосы обеспечивают специальный метод работ – водопонижение [1, 2].

В статье М. А. Потапова [2] и [3] упоминается об использовании специализированных погружных насосов в качестве машин для транспортировки пульпы при механизированной проходке стволов VSM-способом. Центробежные насосы также используются для охлаждения основных приводных и вспомогательных машин проходческих механизированных щитов.

Водоотливные установки перегонных тоннелей в зависимости от точки их установки классифицируются на *основные, транзитные и местные*. Основные находятся либо в пониженных точках тоннельных линий большой протяженности, либо в котлованах – монтажных щитовых камерах, камерах съездов или станциях мелкого заложения, куда принимается вода из перегонных тоннелей. Так, при строительстве Московского метрополитена высоты таких котлованов не превышают 25 м. В редких случаях, как, например, при строительстве перегонного тоннеля от «Рижской» до «Марьиной Рощи» Северо-восточного участка Третьего пересадочного контура, глубина монтажной камеры может достигать 40–50 м.

Требования, предъявляемые водоотливным установкам согласно СП «Метрополитены», указаны в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Требования, предъявляемые водоотливным установкам
согласно сводам правил «Метрополитены» /
Requirements for drainage installations according to the SP
«Metropolitan railways»

Виды водоотливных установок	Производительность каждого насоса, м³/ч, не менее		Количество насосов		
	глубокого заложения	мелкого заложения	Всего	Работающих в нормальном режиме	В ремонте
Основные	150	50	3	2	1
Транзитные			2	1	1
Местные	50		2	1	1

Особенность откачиваемой воды – в неоднородности ее состава в зависимости от геологических условий и строительного участка. При механизированной проходке тоннелей качество воды сильно ухудшается глинистыми и песчаными взвешями, которые остаются в лотковой части проходческого комплекса, по всей трассе тоннеля. Особенно в пониженных точках из-за особенностей консистенции жидкого грунта, транспортируемого либо бадьями (пролив при торможении, старте, на уклонах и подъемах), либо конвейерным транспортом (промывка ленты). Также требуется откачка воды, остающейся после очистки от грязи машин и механизмов после каждого цикла проходки (при установке кольца) для безопасного прохода персонала. Вследствие этого качество перекачиваемой воды может варьироваться от чистой до сильно зашламленной воды.

На рисунке 1 показан вид лотковой части тоннелепроходческого комплекса со стороны забойной части.

Также забойный водоотлив выполняет страховочную функцию при потере щитовым комплексом герметичности щеточного уплотнения [4]. В этих условиях, согласно ГОСТ 27.003-2016 [5], водоотлив можно отнести к объектам многократного циклического применения.



Рис. 1. Вид технологической тележки тоннелепроходческого
механизированного комплекса с грунтопригрузом /
Fig. 1. Type of TBM service trolley with soil load

При горном способе проходки горизонтальных горных выработок в устойчивых породах значение водоотлива резко возрастает. При ручных и полумеханизированных способах проходки уступным способом [6], а также буровзрывных методах важно постоянное осушение забойного пространства от постоянно поступающего водопритока. Качество откачиваемой воды близко к чистой. Но в отличие от щитовой проходки забойные насосы задействованы практически непрерывно.

На подземных строительных работах значительное внимание уделяется водоотливу, на который выделяется отдельный обслуживающий персонал и инженерно-технический персонал, ответственный за исправное техническое состояние оборудования. Но в строительных организациях зачастую отсутствуют регламенты обслуживания водоотливных установок и, в частности, центробежных насосов.

Обслуживание центробежных насосов можно разделить на три основные категории [7]:

1. Основное техническое обслуживание, например, очистка насоса. Касается тех работ, которые должны выполняться в том или ином виде для долговременной службы насосного оборудования.

2. Устранение неисправностей, требующих небольших ремонтных работ, например неисправности подшипников и утечки из-за дефектов уплотнений. Предусматривается замена изнашиваемых деталей насосной установки при длительной работе.

3. Устранение серьезных неисправностей, требующих замены, например прогорание статора или повреждение крыльчатки насоса. В статье Н. П. Овчинников говорит о влиянии износа крыльчатки на рабочие характеристики насоса [8]. Описывает серьезные повреждения, обычно вызванные неожиданными неисправностями (случайные отказы) или отсутствием обслуживания.

Хорошо спроектированная система мониторинга сможет помочь персоналу, который склонен совершать ошибки в любой из трех упомянутых категорий.

Традиционно первые две категории работ, в том числе и на предприятиях, занятых в подземном строительстве, выполняются путем планового технического обслуживания или, что чаще встречается, обслуживания после отказа в специальных ремонтно-механических цехах. В каждую плановую процедуру обслуживания закладывается определенный набор быстро изнашиваемых деталей, которые меняют во избежание будущих поломок.

При использовании системы мониторинга обслуживание может быть выполнено по запросу, что сэкономит затраты на ненужные запасные части. И, что еще более важно, насос следует останавливать для технического обслуживания только тогда, когда это действительно необходимо.

Для последней категории система мониторинга сможет обнаруживать и останавливать насос до того, как данная неисправность вызовет полную поломку насоса. Для производительных насосов при своевременном обнаружении неисправностей станет возможен ремонт (для некоторых насосов малой производительности крупный капитальный ремонт нецелесообразен), что будет означать сэкономленные средства вместо покупки нового оборудования.

Цель работы: проведение обзора перспективных систем мониторинга водоотливных установок при строительстве подземной части метрополитена.

Методы работы

Представленная работа основана на анализе актуальной научно-технической информации в виде научных работ, статистических сборников (World Mining Data, Mining Risk Review), информационно-аналитических порталов (investing.com, companiesmarketcap.com, mining-technology.com), сайтов горнодобывающих компаний.

Проведена оценка возможности применения современных методов диагностики насосного оборудования (вибродиагностика, акустический анализ, термография, анализ параметров работы), а также перспективных методов IoT дистанционного контроля состояния рабочих органов насосов.

Результаты работы

Некоторые из этих упомянутых элементов системы мониторинга уже используются в существующей системе водоотлива, что позволяет снизить затраты на внедрение системы мониторинга. Неисправности в центробежных насосах различных типов можно классифицировать по конструктивным блокам насосов и природе этих неисправностей.

Механические неисправности электродвигателя

Обнаружению и идентификации неисправностей в асинхронных двигателях в последние годы уделяется много внимания. В работе рассматриваются все виды неисправностей асинхронных двигателей. В [9, 10] утверждается, что основные причины неисправностей асинхронных двигателей можно разделить на три группы, изображенные на рисунке 2.

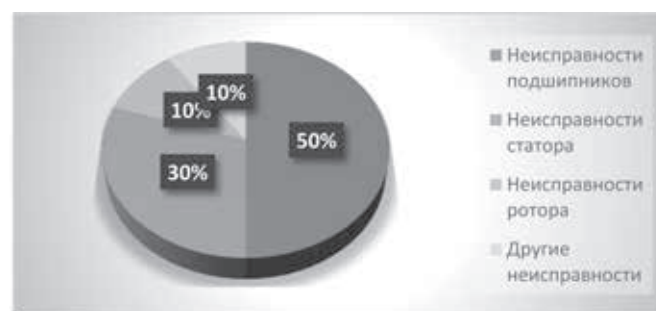


Рис. 2. Основные неисправности приводного электродвигателя центробежного насоса /

Fig. 2. Main failures of the drive electric motor of a centrifugal pump

Большинство механических поломок двигателей происходит из-за неисправностей подшипников. Однако есть и другие критические поломки, например изгиб вала, в результате чего может произойти соприкосновение статора и ротора.

Для всей группы механических неисправностей наиболее часто используемые схемы обнаружения делятся на две группы:

1. Спектральный анализ токов двигателя [11, 12].
2. Спектральный анализ вибрационных сигналов.

Спектральный анализ токов двигателя исследуется в [13–15]. В [16] вейвлет-анализ используется для анализа тока статора при запуске для обнаружения неисправностей подшипников, а в [14] спектр тока во время работы в установленном режиме используется также для диагностики подшипников. В [13] дается обзор различных методов анализа

сигналов: преобразования Фурье, вейвлет-анализа, модуляции и демодуляции сигнала.

В настоящий момент существуют коммерческие продукты на основе анализа спектра вибрации для обнаружения механических неисправностей. Такие компании, как SKF и Brüel & Kjær, предлагают портативные, или стационарные, анализаторы вибрации для обслуживающего персонала. На рисунке 3 показан один из них.



Рис. 3. Портативное устройство для мониторинга механических вибраций промышленного оборудования /
Fig. 3. Portable device for monitoring mechanical vibrations of industrial equipment

На рисунке 3 отображается спектр вибраций, предоставляя пользователю возможность интерпретировать сигнал и тем самым сделать вывод, исправен двигатель или нет. Обслуживающему персоналу при наблюдении за частотным спектром можно установить пороги срабатывания сигнализации на части этого спектра.

Несмотря на то что анализ сигналов вибрации считается наиболее часто используемым методом для обнаружения механических неисправностей в электродвигателях, усовершенствованные устройства защиты электродвигателей могут обнаруживать и некоторую степень механических неисправностей. Такие устройства защиты двигателя предлагают Siemens, Rockwell Automation и ABB.

С помощью устройств защиты двигателя, показанных на рисунке 4, можно обнаружить такие неисправности, как блокировка ротора и высокая температура обмотки, которые могут быть вызваны механическими неисправностями.

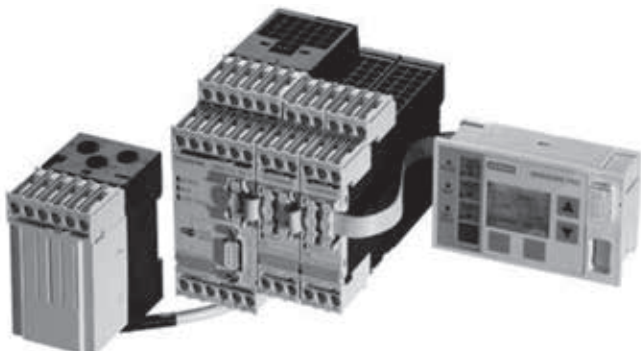


Рис. 4. Устройство управления и защиты электродвигателя /
Fig. 4. Motor control and protection device

Электрические неисправности электродвигателя

Неисправности статора и ротора обозначаются как электрические неисправности. Эти неисправности несут ответственность за 35–50 % неисправностей в асинхронных

двигателях. Единственная упомянутая электрическая неисправность – в роторе сломан штанг ротора.

Однако для статора электродвигателя рассматриваются три основные группы неисправностей. Они включают в себя: межвитковые короткие замыкания; межфазные короткие замыкания и фазу на землю. Из них наибольшее внимание привлекла неисправность межвиткового короткого замыкания. Это можно объяснить ссылкой на [17, 18], где утверждается, что межфазные замыкания или замыкания на землю часто начинаются с межвиткового замыкания цепи в одной из фаз статора.

Для крупных промышленных водоотливных установок могут использоваться интеллектуальные блоки защиты двигателя. Эти блоки защиты могут обнаруживать замыкания на землю и перегрузки по току, которые могут быть инициированы межвитковыми короткими замыканиями. Эти типы устройств защиты двигателя доступны, например, для Siemens, Rockwell Automation и ABB. Кроме того, инструменты автономного анализа (рис. 5) доступны, например, в компании Baker Instrument Company, которая способна обнаруживать межвитковое короткое замыкание в статорах электрических машин напрямую.



Рис. 5. Анализатор обмоток электродвигателя /
Fig. 5. Motor winding analyzer

Неисправности гидравлической части центробежного насоса

Наиболее частая причина неисправностей гидравлической части центробежных насосов – кавитация. Кавитация – это явление, физический процесс, характеризующийся образованием пузырьков (каверны, пустоты) в жидкой транспортируемой среде с последующим их схлопыванием и высвобождением большого количества энергии. В результате чего рабочее колесо разрушается после достаточно небольшого срока службы.

В литературе также рассматриваются и другие неисправности.

Здесь упоминаются самые важные из них:

- препятствие внутри насоса или во впускной или выпускной трубе. Данной проблеме посвящено множество работ, в том числе современные исследования, посвященные раннему обнаружению проблем, связанных с гидравлическим ударом [19]. Данный вопрос является серьезным и может приводить к полному разрушению механической части насоса;
- утечка из насоса из впускной или выпускной трубы;
- утечка внутри насоса;
- блокировка рабочего колеса;
- дефект крыльчатки;
- неисправности подшипников.

Далее рассматриваются методы обнаружения кавитации и

обзор наиболее интересных подходов к обнаружению переносимых выше неисправностей.

Обнаружение кавитации

Явление кавитации известно на протяжении десятилетий и рассматривается в большинстве книг о центробежных насосах [20, 21]. Кавитация традиционно определялась в точке, где давление насоса упало на 3 %. Но поскольку деградация насосного агрегата начинается задолго до 3 %-ного предела, то ниже упомянуты прогрессивные методы обнаружения кавитации до этой точки падения давления насоса.

Предложенные подходы к обнаружению кавитации сводятся к регистрации сигналов механических колебаний, высокочастотных пульсаций давления, акустических шумов [22] и наблюдений.

Сигнал механической вибрации исследован в [23], а в [21] утверждается, что сигнал давления имеет преимущество перед сигналом вибрации. Высокочастотный сигнал давления также рассматривается в [24], где связь кавитации внутри насоса и пульсации давления установлены на основе экспериментов, представленных в статье. То же самое зафиксировано в [25], где приводятся испытания на контролируемую кавитацию в специально разработанном трубопроводе.

Более сложные методы приведены в [26–27]. Аудиомикрофоны размещены вокруг насоса и собирают звуковой шум, создаваемый кавитацией, а в [27] внутри насоса размещена камера наблюдения, которая снимает пузыри, возникающие во время кавитации.

Более современные исследования кавитации насоса направлены на опознание кавитационных процессов на основе механических вибраций насоса при помощи акселерометра [28].

Мониторинг производительности и обнаружение неисправностей

Сигнал механической вибрации был предложен для общего обнаружения неисправностей в центробежных насосах [20, 29]. В [20] утверждается, что изменение уровня вибрации насоса может использоваться как указание на необходимость обслуживания.

Спектр сигналов вибрации также используется для обнаружения и идентификации числа частот неисправностей центробежных насосов [30, 31]. Этот вопрос так же подробно рассмотрен в русскоязычных источниках и справочниках [32–35]. В [30] текущий спектр используется как входные данные для классификатора неисправностей на основе нечеткой логики.

На сегодняшний день на рынке представлены устройства мониторинга гидравлической части насоса. Например, компания Grundfos разработала блок CU3 для защиты погружных насосов (рис. 6).

Компания KSB запустила в производство модуль PumpExpert, который позволяет обнаруживать кавитацию, дефекты подшипников и износа рабочего колеса. Кроме того, в устройство включена защита от сухого хода. Подход к идентификации основан на «дереве отказов». Аналогичным образом ITT запустила набор модулей мониторинга с брендом PumpSmart. Этот блок мониторинга основан на оценке уровня текущей рабочей мощности и находит неисправности, влияющие на уровень мощности. Сигнализация может настраиваться на разные рабочие точки насоса.



Рис. 6. Блок управления насосом на основе датчика давления / Fig. 6. Pump control unit based on a pressure sensor

Также существуют специальные датчики для защиты уплотнений. Так, компания Grundfos предлагает датчик влажности LiqTec для защиты уплотнений, смазываемых водой.

Помимо упомянутых выше продуктов, существуют центробежные насосы со встроенными электронными блоками управления, предлагающие обнаружение ошибок и защитное отключение оборудования. Еще более дорогими могут быть индивидуальные системы мониторинга под конкретную водоотливную установку.

Индивидуально разработанная система мониторинга может использовать различные наборы датчиков.

Для центробежных насосов могут быть использованы следующие датчики:

- датчики тока и датчики напряжения;
- датчики абсолютного давления и разности давлений;
- датчики потока и датчики температуры;
- датчики тока и напряжения, а также расхода и давления.

Предложения автора

1. Применительно к условиям строительства подземных городских сооружений предлагается провести аудит применения насосных систем в разных сферах подземного строительства и определить целесообразность применения тех или иных систем мониторинга.

2. Предлагается нижеприведенная экспертная оценка рассмотренных систем мониторинга и обнаружения неисправностей.

Для насосов местного водоотлива целесообразно применение акустического вибромониторинга переносными устройствами с визуальным осмотром.

Главные водоотливные установки, принимающие воду из тоннелей, предлагается оснастить блоками управления, основанными на диагностике гидравлической части насоса, а также датчиками, визуализирующими основные показатели: давление, расход, ток электродвигателя.

Для более сложных водоотливных систем, к примеру, используемых при водопонижении, или циркуляционного водяного охлаждения щитовых комплексов целесообразно применять комплексные стационарные системы оценки на основе моделей и сигналов, получаемых от датчиков системы мониторинга.

Заключение

1. В данной статье приведен краткий обзор условий применения водоотливных насосных систем как одного из процессов строительства подземных сооружений, в частности метрополитена.

2. Приведена оценка основных групп неисправностей, возникающих во время эксплуатации насосного оборудования, а также сгруппированных по местам возникновения поломки методы обнаружения неисправностей центробежных насосов, в том числе и погружных с электродвигателем.

3. Результаты исследований могут быть полезными при проведении работ по строительству подземных сооружений, для руководящего состава строительных организаций и линейных инженерно-технических работников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. СНиП 32-02-2003 Метрополитены»: СП 120.13330.2012 : утв. Министерством регионального развития 30.06.2012: введ. в действие с 01.01.2013. Москва, 2016: 58 [SNiP 32-02-2003 Subways: SP 120.13330.2012: approved by the Ministry of Regional Development on 30.06.2012: put into effect on 01.01.2013. Moscow, 2016: 58 (In Russ.)]
2. Потапов МА, Потапова ЕВ. Стволопроходческие комплексы: практика применения для проходки вертикальных стволов Московского метрополитена за последние 10 лет. *Метро и тоннели*. 2016;2:12-7 [Potapov MA, Potapova EV. Shaft boring complexes: practice of application for driving vertical shafts of the Moscow metro over the past 10 years. *Metro and tunnels*. 2016;2:12-7 (In Russ.)]
3. Есауленко ПП. Новый прорыв в технологии проходки шахтных стволов. *Метро и тоннели*. 2020;3:42-4. [Esaulenko PG. A new breakthrough in shaft sinking technology. *Metro and Tunnels*. 2020;3:42-4 (In Russ.)]
4. Федунец БИ, Мазеин СВ. Оснащение щита для минимизации осадки земной поверхности грунтопригрузом тоннелепроходческого механизированного комплекса. *Метро и тоннели*. 2016;2:4-6. [Fedunets BI, Mazein SV. Shield equipment to minimize surface subsidence by using earth pressure in a tunnel boring machine. *Metro and Tunnels*. 2016;2:4-6 (In Russ.)]
5. Надежность в технике (ССНТ). Состав и общие правила задания требований по надежности: ГОСТ 27.003-2016. Введ. 2017.09.01. Москва, 2018:14. [Reliability in engineering (SSNT). Structure and general rules for reliability requirements: GOST 27.003-2016. Enacted 2017.09.01. Moscow, 2018:14 (In Russ.)]
6. Пашковец ВС. Способы проходки тоннелей в условиях крупных городов. *Master's Journal*. 2019;1:102-9. [Pashkovets VS. Methods of tunneling in large cities. *Master's Journal*. 2019;1:102-9 (In Russ.)]
7. Kallesøe C. Fault detection and isolation in centrifugal pumps. Department of Control Engineering. Aalborg University, 2005.
8. Овчинников НП. Прочностной расчет вала насоса с изношенным рабочим колесом. *Инженерные технологии и системы*. 2017;27:4. [Ovchinnikov NP. Strength calculation of a pump shaft with a worn impeller. *Engineering technologies and systems*. 2017;27:4 (In Russ.)]
9. Baldassarre A, de Lucia M, Nesi P. Real-Time Detection of Cavitation for Hydraulic Turbomachines. *Real-Time Imaging*. 1998;4(6):403-16.
10. Каримова АЛ. Способ повышения эксплуатационных характеристик насосных агрегатов нефтеперекачивающих станций. *Аллея науки*. 2020;2(11):147-9. [Karimova AL. Method for improving the performance of pump units at oil pumping stations. *Science Alley*. 2020;2(11):147-9 (In Russ.)]
11. Kumar EA, Singh EA, Maurya RM. Assessment of Mechanical Problems for Centrifugal Pumps in Eastern Uttar Pradesh, India. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*. 2018; 4(9):686-9.
12. Luo Y, Han Y, Zhang F. Research on the operation condition indicator for centrifugal pump based on sensorless monitoring technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E. Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021;235(2):514-26.
13. Eren L, Devaney MJ. Motor bearing damage detection via wavelet analysis of the starting current transient. *IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No. 01CH 37188)*. 2001;3:1797-800.
14. Schoen RR, et al. Motor bearing damage detection using stator current monitoring. *IEEE transactions on industry applications*. 1995;31(6):1274-9.
15. Benbouzid MEH. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE transactions on industrial electronics*. 2000;47(5):984-9.
16. Friedrichs J, Kosyna G nter. Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed. *J. Fluids Eng*. 2002;124(2):356-2.
17. Bonnett AH, Soukup GC. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry applications*. 1992;28(4):921-37.
18. Kliman GB, et al. A new approach to on-line turn fault detection in AC motors. *IAS'96. Conference Record of the 1996. IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*. 1996;1:687-93.
19. Dutta N, et al. Identification of water hammering for centrifugal pump drive systems. *Applied Sciences*. 2020;10(8):2683.
20. Surek D. Pressure oscillations in side channel pumps. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2000;66(2):79-93.
21. Sayers AT. Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines. Oxford: McGraw-Hill, 1990:456.
22. Murovec J, et al. Psychoacoustic approach for cavitation detection in centrifugal pumps. *Applied Acoustics*. 2020;165:107323.
23. Lohrberg H. et al. Numerical and experimental investigations on the cavitating flow in a cascade of hydrofoils. *Experiments in fluids*. 2002;33(4):578-86.
24. Friedrichs J, Kosyna G nter. Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed. *J. Fluids Eng*. 2002;124(2):356-62.
25. Neill GD, et al. Detection of incipient cavitation in pumps using acoustic emission. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E. *Journal of process mechanical engineering*. 1997;211(4): 267-77.
26. Čudina M, Prezelj J. Noise generation by rotating stall and surge in a vacuum cleaner suction unit. *Fan Noise 2003: Proceedings of the 2nd International Symposium, An International INCE Symposium*. Senlis, France: CETIM, Technical Centre for Mechanical Industries; CETIAT, 2003: 1-8.
27. Baldassarre A, de Lucia M, Nesi P. Real-time detection of cavitation for hydraulic turbomachines. *Real-Time Imaging*. 1998;4(6):403-16.
28. Hajnaye A, et al. Vibration-based cavitation detection in centrifugal pumps. *Diagnostyka*. 2017;18(3):77-83.
29. le Bleu Jr J, Xu M. Vibration monitoring of sealless pumps using spike energy. *Sound & Vibration*. 1995;29(12):10-6.
30. Perovic S, Unsworth PJ, Higham EH. Fuzzy logic system to detect pump faults from motor current spectra. *Conference record of the 2001 IEEE industry applications conference*. 2001;1:274-80.
31. Kenull T, Kosyna G, Thamsen PU. Diagnostics of submersible motor pumps by non-stationary signals in motor current. *ASME fluids engineering division summer meeting*. 1997; 11.
32. Костюков ВН, Науменко АП. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие. Омск, 2011:360. [Kostyukov VN, Naumenko AP. Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring: textbook. Omsk, 2011:360 (In Russ.)]

33. Костюков ВН, Наumenко АП, Кудрявцева ИС. Оценка модуля характеристической функции виброакустического сигнала при заданном параметре для предельных состояний объекта диагностирования. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017;5(4). [Kostyukov VN, Naumenko AP, Kudryavtseva IS. Evaluation of the characteristic function modulus of a vibroacoustic signal under a given parameter for limit states of the diagnostic object. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2017;5(4) (In Russ.)]

34. Клюев ВВ и др. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т: Т. 7: Метод акустической эмиссии. Москва, 2005. [Klyuev VV et al. Non-destructive testing: Handbook in 7 volumes: Vol. 7: Acoustic emission method. Moscow, 2005 (In Russ.)]

35. Петрухин ВВ, Петрухин СВ. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие. Москва, 2010:176. [Petrukhin VV, Petrukhin SV. Fundamentals of vibration diagnostics and vibration measurement tools: textbook. Moscow, 2010:176 (In Russ.)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Егор Александрович Александров – аспирант 3-го курса кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСЦ», 119049, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: swat94@inbox.ru

ABOUT THE AUTHOR

Egor A. Aleksandrov – PhD Student (3rd year) at the Department of Mining Equipment, Transport, and Mechanical Engineering, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National University of Science and Technology MISiS», 119049, Moscow, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.01.2025.

Поступила после рецензирования: 07.03.2025.

Принята к публикации: 26.03.2025.

Article info

Received: 21.01.2025.

Revised: 07.03.2025.

Accepted: 26.03.2025.