

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-113-120

THE WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL TRANSSHIPPING EQUIPMENT MAINTENANCE

Y. E. Ezhov, A. K. Bardin, V. A. Sidorenko

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

It is noted that on the background of rapidly developing technologies and economic-industrial relations, the service of maintenance and repair of industrial equipment is undergoing a significant transformation. It is emphasized that the effective performance of industrial equipment is largely determined by the perfection of the methods of maintenance and repair. Equipment maintenance costs account for up to 60% of total operating costs. Therefore, improving the maintenance system to reduce costs is the most important reserve of efficiency. Currently, there are active searches for ways to improve the quality and efficiency of equipment maintenance and repair. The strategies for the maintenance and repair of industrial equipment have reviewed and analyzed in the paper, a strategy is proposed and a way to improve the efficiency of maintenance and repair of rotary equipment by using technologies to monitor the actual condition of the equipment is described. The use of the actual state monitoring system is based on the fact that the interrelation between the technical malfunctions of the equipment and the diagnosable parameters (vibration, temperature, rotation frequency, etc.) has been revealed. With regard to expensive transshipping machines with unique equipment, a stationary system for the actual state monitoring is proposed to use. It is noted that the actual state monitoring system contributes to identify the majority of recognizable defects that can occur in the equipment by fixing the diagnostic signs and parameters, warning that the defects are present, developing and can lead to the equipment failure. The compiled and processed results of equipment monitoring are provided in a convenient form to the computer of employee responsible for the technical condition of the equipment. Based on the obtained results, the conclusion on advisable use of stationary systems for the monitoring of the equipment actual condition is made.

Keywords: maintenance, repair, efficiency, monitoring system, actual condition, rotary equipment, sensor, parameter.

For citation:

Ezhov, Yurii E., Aleksey K. Bardin, and Vladimir A. Sidorenko. "The ways to improve the efficiency of industrial transshipping equipment maintenance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.1 (2019): 113–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-113-120.

УДК 62–91

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю. Е. Ежов, А. К. Бардин, В. А. Сидоренко

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что на фоне быстро развивающихся технологий и экономико-промышленных отношений, сервис технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования претерпевает значительную трансформацию. Подчеркивается, что эффективная работоспособность промышленного оборудования во многом определяется совершенствованием методов технического обслуживания и ремонта. Затраты на техническое обслуживание оборудования составляют до 60 % от общих эксплуатационных затрат. Поэтому совершенствование системы технического обслуживания с целью снижения затрат является важнейшим резервом эффективности. В настоящее время ведутся активные поиски путей повышения качества и эффективности технического обслуживания и ремонта оборудования. В статье выполнены обзор и анализ стратегий технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования, предложена стратегия и описан путь повышения эффективности технического обслуживания и ремонта

оборудования роторного типа путем использования технологий мониторинга фактического состояния оборудования. Использование системы мониторинга фактического состояния основано на том, что выявлена взаимосвязь между техническими неисправностями оборудования и диагностируемыми параметрами (вибрация, температура, частота вращения, и т.д.). Применительно к дорогостоящим перегрузочным машинам с уникальным оборудованием предлагается применение стационарной системы мониторинга фактического состояния. Отмечается, что система мониторинга фактического состояния помогает выявлять большинство распознаваемых дефектов, которые могут возникать в оборудовании, путем фиксирования диагностических признаков и параметров, предупреждая о том, что дефекты присутствуют, развиваются и могут привести к отказу оборудования. Скомпилированные и обработанные результаты мониторинга оборудования предоставляются в удобной форме на компьютер ответственного за техническое состояние оборудования сотрудника. На основе полученных результатов сделан вывод о целесообразности использования стационарных систем мониторинга фактического состояния оборудования.

Ключевые слова: техническое обслуживание, ремонт, эффективность, система мониторинга, фактическое состояние, роторное оборудование, датчик, параметр.

Для цитирования:

Ежов Ю. Е. Пути повышения эффективности технического обслуживания промышленного перегрузочного оборудования / Ю. Е. Ежов, А. К. Бардин, В. А. Сидоренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 113–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-113-120.

Введение (Introduction)

What gets measured gets improved
(Что измеряется, улучшается).

П. Друкер

В современном мире новые технологии меняют жизнь людей и экономико-промышленные отношения. В последнее время все большую силу набирает так называемая «Индустрия 4.0». Данная концепция направлена на повышение эффективности использования производственных мощностей. Концепция «Индустрия 3.0», как правило, требовала автоматизации отдельных машин и процессов, в то время как концепция «Индустрия 4.0» предлагает использование технологии *IoT* (англ. *Internet of Things*) для всех физических активов. Внедрение концепции «Индустрия 4.0» возможно при наличии хорошо налаженных процессов получения и анализа данных, а также обмена между ними. Реализация этой концепции демонстрирует доходы от цифровых решений и экономию операционных затрат.

Эффективная работоспособность промышленного оборудования во многом определяется совершенством методов технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). При этом затраты на техническое обслуживание оборудования составляют до 60 % от общих эксплуатационных затрат. Поэтому совершенствование системы технического обслуживания с целью снижения затрат является важнейшим резервом [1]–[3].

Эффективность ТО и Р определяется отношением максимально возможного его результата (высокое качество работ при соблюдении нормативного срока ремонта) к минимально возможным эксплуатационным расходам (минимально обоснованный уровень затрат без потери качества и объема выполненных работ). Для достижения данной цели следует выбрать методы, исходя из имеющегося опыта [2], [4].

В настоящее время большинство владельцев оборудования придерживаются традиционных, или дискретных, плановых ТО и Р по машино-часам или интервалам времени, которые не гарантируют безаварийную работу оборудования [2], [4], [5]. При этом даже увеличение объема и стоимости ТО и Р не гарантирует достаточности выполненных работ, что приводит к увеличению затрат на простои и аварийные ремонты оборудования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Обзор стратегий ТО и Р. Условно можно выделить три направления развития стратегий ТО и Р.

Первое направление — I стратегия — предполагает эксплуатацию оборудования до отказа. По факту такая стратегия используется, но этот вид ТО снижает рабочий ресурс оборудования, безопасность эксплуатации и противоречит действующему законодательству РФ.

Второе направление — II стратегия — основана на широко распространенной и отлаженной системе планово-предупредительных работ (ППР);

Третье направление — III стратегия — основана на предупреждении отказа оборудования за счет применения диагностики и мониторинга технического состояния и прогнозирования отказов. Данная стратегия не противоречит классическому подходу ППР, а наоборот, делает их более эффективными за счет более точного прогнозирования технического состояния отдельных узлов и механизмов, а также анализа последствий возможных отказов конкретного оборудования.

Каждая из указанных стратегий имеет свои аргументы «за» и «против» использования. У предприятий, планирующих устойчивое долгосрочное развитие, наблюдается постоянное стремление к объединению достоинств основных стратегий ТО и Р путем использования совмещенного ТО, направленного как на снижение общего объема ТО, так и на максимизацию срока службы оборудования [4]–[6].

Стратегия использования данных о фактическом состоянии оборудования. Данная стратегия базируется на проведении постоянного мониторинга и анализа оборудования специально обученным высококвалифицированным персоналом. Часть информации об оборудовании специалист может получать в результате «оцифровки» существующего старого оборудования путем установки соответствующих датчиков (вибродатчик, датчик соосности, состояния масла и т. д.) или использования информации с «цифровых носителей» в случае эксплуатации нового оборудования (например, с частотных преобразователей, ПЛК и т. д.) [7]. На рис. 1 показана разница стоимости обслуживания оборудования в зависимости от выбранных стратегий с учетом затрат от простоев оборудования.

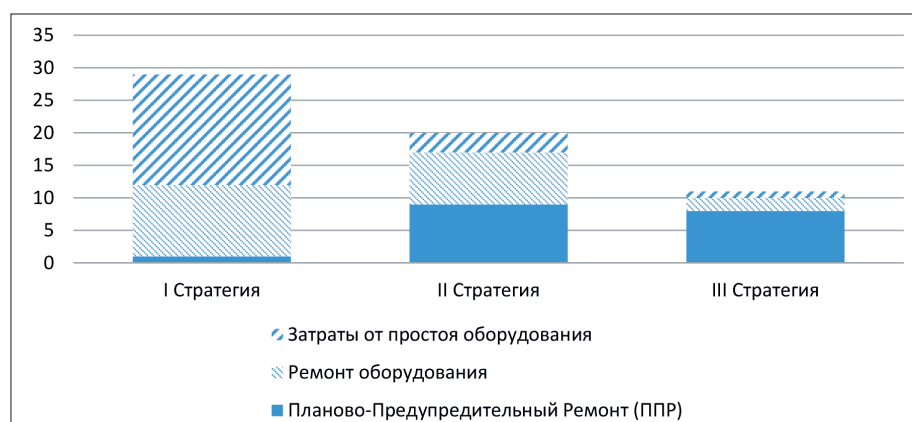


Рис. 1. Статистическая стоимость обслуживания оборудования при разных стратегиях ТО и Р

Стратегия мониторинга фактического состояния оборудования. В перегрузочной технике наиболее распространено оборудование роторного типа. Применительно к дорогостоящим перегрузочным машинам с уникальным оборудованием, с нашей точки зрения, наиболее целесообразно применить стационарную систему мониторинга фактического состояния (МФС). Использование системы МФС основано на том, что выявлена взаимосвязь между техническими неисправностями оборудования и диагностируемыми параметрами. Система МФС помогает выявлять большинство распознаваемых дефектов, которые могут возникать в оборудовании, путем фиксирования диагностических признаков и параметров, сигнализируя о том, что дефекты присутствуют, развиваются и могут привести к отказу оборудования [4]–[6]. Мониторинг состояния механизмов оборудования целесообразно проводить по следующим параметрам: вибрация, температура, частота вращения, момент. Для измерения параметров должны использоваться соответствующие стационарные датчики и модули. Замеры параметров предлагается выполнять автоматически с фиксированным интервалом времени, например, 0,5–1 ч.

Датчики устанавливаются на контролируемые объекты оборудования. Монтаж датчиков производится болтовым или шпилечным соединениями. Датчики соединяются с «переходными» блоками, которые, в свою очередь, обеспечивают ремонтпригодность оборудования.

Датчики соединяются с «Блоком управления» (БУ) — рис. 2, который производит первичную обработку сигналов. Далее по каналу связи выполняется передача результатов диагностирования и первичного анализа на «Сервер» владельца оборудования. «Сервер» выполняет функции хранения данных мониторинга и конечного анализа полученных результатов. Вывод скомпилированной информации производится в удобной форме (например, на монитор ответственного лица за техническое состояние оборудования эксплуатирующей организации).

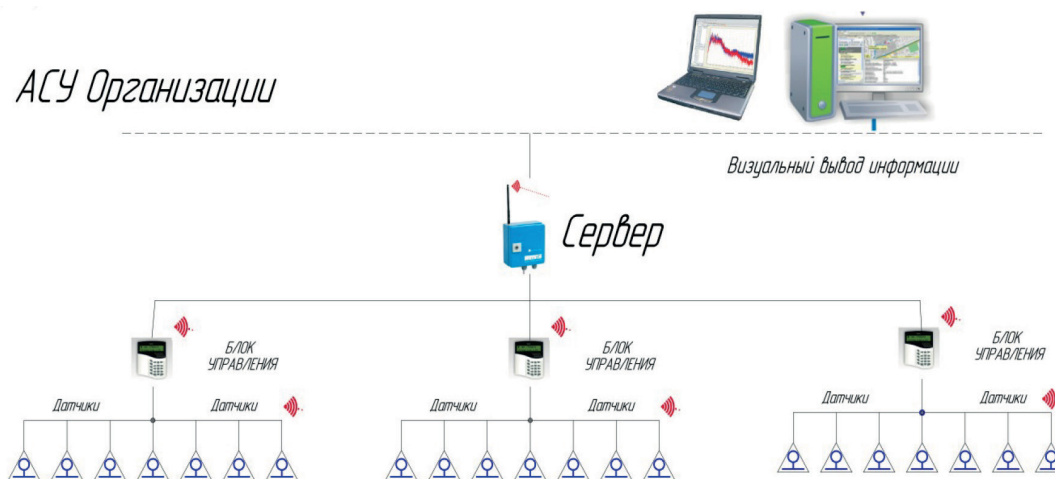


Рис. 2. Схема мониторинга фактического состояния оборудования

На практике исходными данными для проведения анализа является история измерения параметров во времени, которая представлена в цифровом и визуальном виде в работах [6], [7]. Визуализацию результатов анализа необходимо разделить на четыре зоны тремя условными линиями: оповещения, предупреждения и сигнализации (рис. 3). Применение средств визуализации позволяет добиться значительного повышения эффективности и необходимого качества использования системы МФС, максимальной производительности труда сотрудников, обслуживающих систему МФС и оптимизации трудозатрат на поддержание оборудования в работоспособном состоянии.

Среди особенностей, предлагаемых МФС, необходимо выделить следующие:

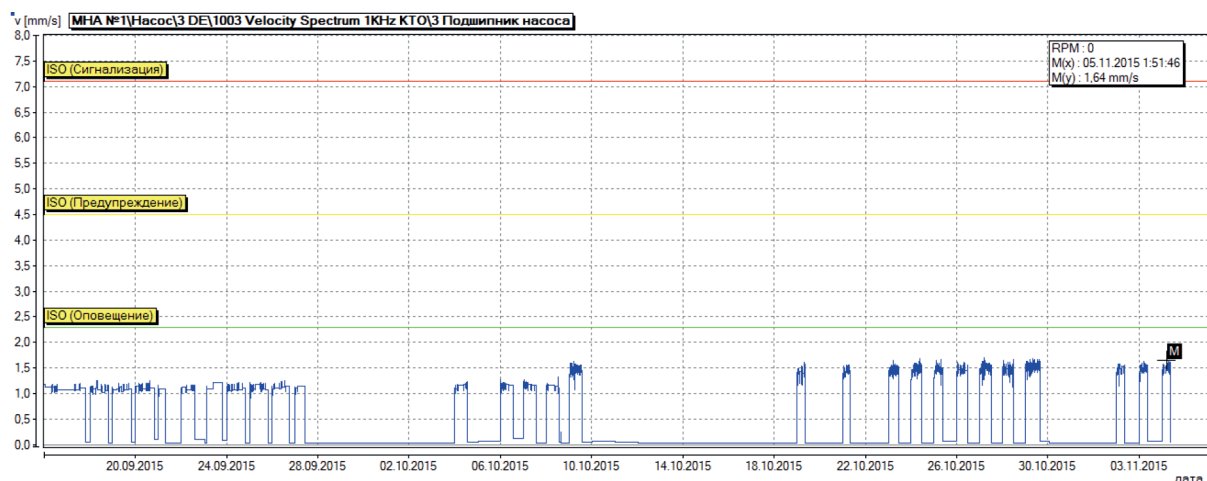
- возможность запоминания и обработки (Big Data), в том числе измеряемых параметров, без искажений и потерь информации;
- многоканальность с возможностью синхронной записи и анализа сигналов измерительных систем различных измеряемых физических процессов;
- возможность анализа сигналов и вывод информации в удобной форме.

Зона D (выше красной линии) — уровни значений замеряемых параметров, которые в этой зоне могут вызвать серьезные повреждения машины.
Красная линия
Зона C (между красной и желтой линиями) — в эту зону попадают замеры машин, непригодных для длительной непрерывной эксплуатации (такие машины могут функционировать ограниченный период времени до начала ремонтных работ).
Желтая линия
Зона B (между желтой и зеленой линиями) — в эту зону попадают замеры машин, пригодных для эксплуатации без ограничения сроков.
Зеленая линия
Зона A (ниже зеленой линии) — в эту зону попадают замеры новых машин.

Рис. 3. Зоны визуализации результатов анализа

Пример визуализации системы контроля оборудования по фактическому состоянию. Как видно, уровни вибрации на подшипниках электропривода механизмов подъема перегрузочного крана [1] находятся в зонах А и В (см. рис. 3 и 4), что характерно для новых машин и машин, пригодных для эксплуатации без ограничения сроков.

а)



б)

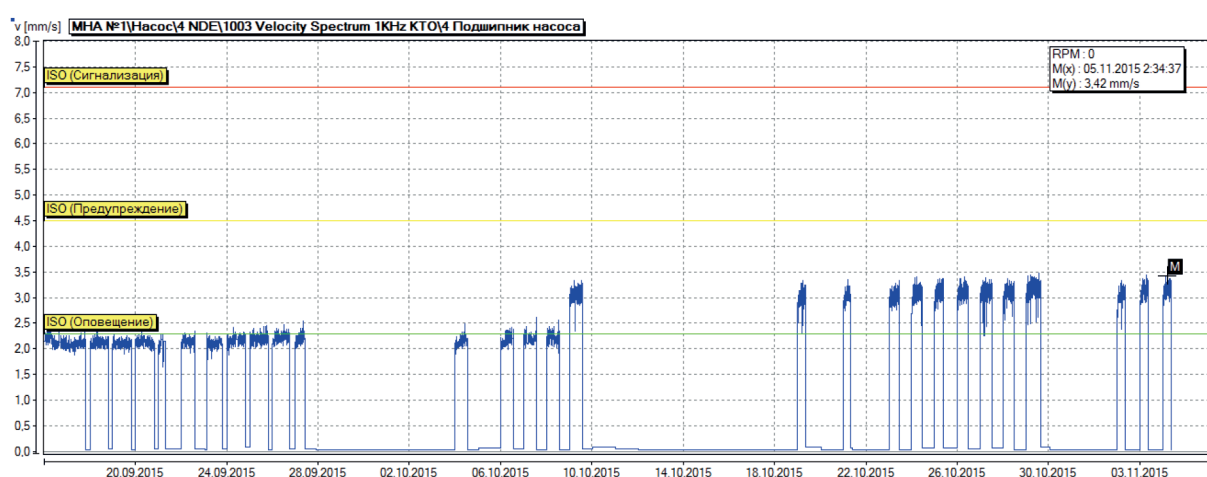


Рис. 4. Пример вывода информации датчиков измерения виброскорости, установленных на подшипниках электропривода механизмов подъема перегрузочного крана:

- а — зеленый уровень (уровень А) — дефекта нет;
- б — желтый уровень — признаки зарождения дефекта

На рис. 5 показаны спектры виброскорости при наличии повышенной вибрации на элементах механизмов, анализ которых позволяет определить причину роста вибрации — дефект, и степень его развития. На графике спектра виброскорости преобладает составляющая на оборотной частоте 50 Гц, что, вероятнее всего, вызвано дисбалансом ротора двигателя.

Диагностика механизмов роторного типа основана на том факте, что каждому дефекту свойственны свои диагностические признаки. Дефекты механизмов наблюдаются в распределении мощности сигнала, в форме временной реализации, в спектральной картине автоспектров, в распределении различных дополнительных параметров вибрации [8]–[10]. Большая часть дефектов роторных механизмов проявляет себя в спектрах гармониками «пики» или «всплесками». Некоторые виды дефектов проявляются в виде изменения общего фона в высокочастотных диапазонах (дефекты смазок в узлах, кавитация, резонансы и т. д.).

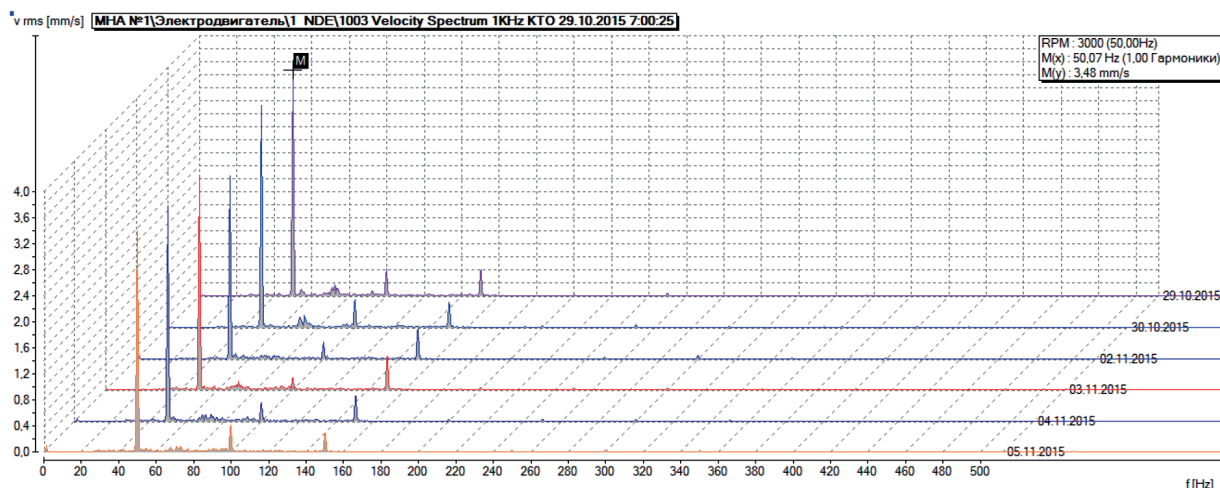


Рис. 5. Спектры виброскорости в «Подшипник ЭД»

Для материалов с высокой степенью поглощения, когда деформация практически полностью переходит в тепло, характерным является изменение общей тепловой картины в местах начала образования усталостных трещин [9], [10]. Таким образом, использование систем МФС может обеспечивать контроль за состоянием механизмов без остановки машин в режиме реального времени и позволяет осуществлять плановое ТО по техническому состоянию. В случае удаленного расположения оборудования можно передавать данные с помощью удаленного мониторинга функционального состояния (УМФС) — удаленного доступа. Благодаря оптимальному соотношению между традиционными способами и методами ФМС и УФМС можно добиться оптимизации прогнозов состояния роторного оборудования.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение УФМС систем помогает более точно планировать необходимые ресурсы (запчасти, инструмент, технику, специалисты и т. д.) для проведения работ во время плановой остановки оборудования в отличие от проведения стандартного ППР, при котором необходимость ремонтов может обнаружиться в процессе выполнения работ. При этом будет увеличен срок ремонта оборудования или ремонт будет перенесен на другое время с уменьшением надежности работы оборудования.

2. Внедрение систем мониторинга фактического состояния требует новых компетенций от персонала. На конференции «Профессии будущего в IT и IoT», состоявшейся 16 февраля 2017 г. в г. Санкт-Петербурге в Конгресс-центре ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ», в качестве профессий «будущего» были выделены в том числе следующие: специалист автоматизированной промышленной диагностики, прогнозист отказа оборудования, команда «Ремонтник 2.0» [9], [11]. На технологичных предприятиях уже началась самостоятельная подготовка «специалистов по качеству», которые должны заниматься планированием ТО и Р в зависимости от фактического состояния оборудования на основе «больших баз данных». Это направление, по нашему мнению, следует развивать и техническим вузам, разрабатывая курсы и открывая новые специальности.

3. Внедрение УФМС позволяет концентрировать внимание на определенных «критических» элементах оборудования роторных механизмов, что дает возможность существенно сократить число элементов, *требующих постоянного контроля*. Опыт показывает, что возникновение ущерба связано в основном с конструктивными недостатками, неправильной эксплуатацией или с комбинацией этих факторов. Производственные ошибки в основном отсутствуют, так как они в подавляющем большинстве случаев проявляются в начале эксплуатации. Применение методов УФМС

показывает необходимость использования системного подхода к анализу различных параметров с прогнозированием возможной погрешности их измерений или определением диапазона разброса значений их характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sada Shiva Bayya. Vibration Monitoring Mathematical Modelling and analysis of Rotating Machinery / Sada Shiva Bayya, I. S. Rajay Vedaraj S., K. Sivasubramanian // *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. — 2013. — Vol. 2. — Pp. 1325–1329.
2. АО «СИ-ЭЛ» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://si-el.ru/> (дата обращения: 10.11.2018).
3. Uhlemann T. H. J. The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0 / T. H. J. Uhlemann, C. Lehmann, R. Steinhilper // *Procedia Cirp*. — 2017. — Vol. 61. — Pp. 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
4. Русов В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. — Пермь: Изд-во «Вибро-Центр», 2012. — 252 с.
5. Минаев В. И. Цена ремонта / В. И. Минаев // *Вестник АТОМПРОМа*. — 2009. — № 5. — С. 40–45.
6. Соколова А. Г. Метод локализации источников повышенной виброреактивности машинного оборудования по данным дискриминантного анализа в задачах вибромониторинга и диагностики неисправностей / А. Г. Соколова // *Вестник научно-технического развития*. — 2010. — № 1 (29). — С. 26–42.
7. Rabah S. Towards improving the future of manufacturing through digital twin and augmented reality technologies / S. Rabah, A. Assila, E. Khouri, F. Maier, F. Ababsa, P. Maier, F. Mérienne // *Procedia Manufacturing*. — 2018. — Vol. 17. — Pp. 460–467. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.070.
8. Pan H. Symplectic geometry mode decomposition and its application to rotating machinery compound fault diagnosis / H. Pan, Y. Yang, X. Li, J. Zheng, J. Cheng // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2019. — Vol. 114. — Pp. 189–211. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.019.
9. Lee J. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications / J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, D. Siegel // *Mechanical systems and signal processing*. — 2014. — Vol. 42. — Is. 1–2. — Pp. 314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004.
10. Захаров С. И. Формирование акустических сигналов машин для цифровой обработки результатов испытаний и диагностики / С. И. Захаров // *Вестник машиностроения*. — 2009. — № 12. — С. 88–90.
11. Проектная сессия FUTURESILLS: новые кадры для IT и IOT [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://worldskills.ru/nashi-proektyi/futureskills.html> (дата обращения: 30.09.2018).

REFERENCES

1. Lee, Jay, Fangji Wu, Wenyu Zhao, Masoud Ghaffari, Linxia Liao, and David Siegel. “Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications.” *Mechanical systems and signal processing* 42.1–2 (2014): 314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004.
2. АО «SI-EL». Web. 10 Nov. 2018 <<http://si-el.ru/>>.
3. Uhlemann, Thomas H-J., Christian Lehmann, and Rolf Steinhilper. “The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0.” *Procedia Cirp* 61 (2017): 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
4. Rusov, V. A. “*Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam*.” Perm: Izd-vo Vibro-Tsent, 2012.
5. Minaev, V. I. “Tsena remonta.” *Vestnik ATOMPROMa* 5 (2009): 40–45.
6. Sokolova, A. G. “Metod lokalizatsii istochnikov povyshennoi vibroreaktivnosti mashinnogo oborudovaniya po dannym diskriminantnogo analiza v zadachakh vibromonitoringa i diagnostiki neispravnostei.” *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* 1(29) (2010): 26–42.
7. Rabah, Souad, Ahlem Assila, Elio Khouri, Florian Maier, Fakreddine Ababsa, Valérybourny, Paul Maier, and Frédéric Mérienne. “Towards improving the future of manufacturing through digital twin and augmented reality technologies.” *Procedia Manufacturing* 17 (2018): 460–467. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.070.
8. Pan, Haiyang, Yu Yang, Xin Li, Jinde Zheng, and Junsheng Cheng. “Symplectic geometry mode decomposition and its application to rotating machinery compound fault diagnosis.” *Mechanical Systems and Signal Processing* 114 (2019): 189–211. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.019.

9. Lee, Jay, Fangji Wu, Wenyu Zhao, Masoud Ghaffari, Linxia Liao, and David Siegel. "Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications." *Mechanical systems and signal processing* 42.1–2 (2014): 314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004.

10. Zakharov, S. I. "Formirovanie akusticheskikh signalov mashin dlya tsifrovoi obrabotki rezul'tatov ispytaniy i diagnostiki." *Vestnik mashinostroeniya* 12 (2009): 88–90.

11. Project Session FUTURESKILLS: new frames for IT and IOT. Web. 30 Sept. 2018 <<https://worldskills.ru/nashi-proektyi/futureskills.html>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ежов Юрий Евгеньевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ezhovye@gumrf.ru

Бардин Алексей Константинович —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: akbardin@mail.ru

Сидоренко Владимир Александрович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vsidd@mail.ru, kaf_texp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ezhov, Yurii E. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: ezhovye@gumrf.ru

Bardin, Aleksey K. —

PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: akbardin@mail.ru

Sidorenko, Vladimir A. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vsidd@mail.ru, kaf_texp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.

Received: November 15, 2018.