

УДК: 621.6
OECD: 2.03

Диагностика промышленного оборудования и локализация дефектов с использованием совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров

Валеев А.Р.^{1*}, Ташбулатов Р.Р.², Харрасов Б.Г.³, Ганиева И.И.⁴
^{1,2} К.т.н., доцент, ³ Заведующий лабораторией, ⁴ Инженер
^{1,2,3,4} Кафедра «Транспорт и хранение нефти и газа», Уфимский
государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, РФ

Аннотация

В работе рассмотрены преимущества и недостатки существующих методов диагностики промышленного оборудования, в особенности вибрационной диагностики, анализирующей спектр вибрации. Для устранения недостатков такого метода предлагается анализ тензометрического спектра, использование которого позволяет получить информацию о расположении дефекта, его частоте и интенсивности колебания. В работе также приведена концепция использования совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров для диагностики промышленного оборудования и локализация дефектов в нем. Представлена методика локализации отдельных импульсов и источников случайной вибрации с использованием тензометрических и вибрационных датчиков. Для ее реализации был разработан специальный электронный блок, проведены экспериментальные исследования, апробирующие данную методику. По результатам эксперимента установлено, что местоположение определяется с достаточной точностью. Таким образом, становится возможным анализ отдельных импульсов и локализация местоположения каждого появляющегося импульса при постоянной или случайной вибрации промышленного оборудования, что повысит надежность и полноту диагностирования.

Ключевые слова: диагностика, спектр, вибрация, техническое состояние, тензометрия.

Diagnostics of industrial equipment and localization of defects using combined analysis of strain and vibration spectra

Valeev A.R.^{1*}, Tashbulatov R.R.², Kharrasov B.G.³, Ganieva I.I.⁴
^{1,2} Phd, associate professor, ³ Laboratory head, ⁴ Engineer
^{1,2,3,4} The department of Transport and Storage of Oil and Gas, Ufa State Petroleum
Technological University, Ufa, Russia

Abstract

The paper considers the advantages and disadvantages of existing methods of diagnostics of industrial equipment, especially vibration diagnostics that analyze the vibration spectrum. To eliminate the disadvantages of this method, an analysis of the strain spectrum is proposed, the use of which allows obtaining information about the location of the defect, its frequency and intensity of vibration. The paper also presents the concept of using a combined analysis of the strain and vibration spectra for the diagnosis of industrial equipment and the localization of defects in it. The method of localization of individual pulses and sources of random vibration using strain gauges and vibration sensors is presented. For its implementation, a special electronic

unit is developed, experimental studies are conducted, testing this technique. According to the results of the experiment, it is found that the location is determined with sufficient accuracy. Thus, it becomes possible to analyze individual pulses and localize the location of each emerging pulse with constant or random vibration of industrial equipment, which increases the reliability and completeness of diagnostics.

Keywords: diagnostics, spectrum, vibration, technical condition, strain gauge analysis.

Введение

При эксплуатации ответственного промышленного оборудования необходимо периодически или непрерывно проводить контроль технического состояния, и при возникновении дефектов проводить диагностику, идентифицировать дефект, определять степень его опасности и оценивать остаточный ресурс [1].

Для выявления причин вибрации промышленного оборудования и оценки состояния отдельных его узлов применяется спектральный метод анализа вибросигналов, основанный на первичном преобразовании Фурье [2]. На основе такого метода уже возможна идентификация отдельных дефектов и причин ухудшения работы оборудования. Также, это преобразование обладает и определенными недостатками: вследствие потери информации о временном факторе искажается представление о динамике изменения спектрального состава сигнала, что не позволяет производить всесторонний анализ вибросигнала. В отдельных случаях это приводит к невозможности однозначного определения дефектов, ведущих к частотной и амплитудной модуляции вибросигнала, таких как нарушение условий смазки подшипников, изгибная деформация рабочего колеса, также возникают сложности выявления скрытых дефектов и разделения между собой основных неисправностей, которые имеют сходные диагностические признаки. В спектр вибросигнала, кроме того, неизбежно попадают частоты различных шумов, помех, резонансных явлений, возможен вклад в общий спектр других источников вибрации. При влиянии шумов, наведенных колебаний и других полигармонических процессов легко могут затеряться полезные сигналы на тех частотах, на которых дефекты наиболее ярко себя проявляют. Поэтому, риск пропуска дефекта достаточно велик. Также данный метод требует информации об опытной наработке данного типа оборудования и формирования базы данных дефектов.

Вариацией упомянутого метода является анализ акустического спектра [3]. Согласно данному методу производится замер акустического сигнала. Дефекты создают дополнительный фон, причем индивидуальный для каждого типа дефекта; производится анализ и распознавание акустического спектра с идентификацией дефектов. Однако подобный метод нуждается в опытной базе соответствующих спектров и может использовать только как вспомогательный.

Методом, использующий принципиально другой подход к диагностике, является анализ состояния масла подшипников оборудования, или в целом трибодиагностика [4]. Анализ масла позволяет получить достоверную информацию о техническом состоянии подшипников, уплотнений, состояния смазки, эффективности работы присадок, наличии ферромагнитных (металлических) и неферромагнитных включений, обводнения, параметров вязкости и качества смазки [5]. Однако неполный спектр диагностируемых дефектов не позволяет данный метод использовать в виде основного [6].

Отмечаем, что существует и ряд других методов, но которые не позволяют однозначно идентифицировать одновременно широкий перечень дефектов. Это такие методы, как параметрическая диагностика, анализ электрических параметров

электродвигателя [7] и т.д.

Таким образом, есть потребность в разработке новых надежных и универсальных методов диагностики промышленного оборудования, а также алгоритмов идентификации и локализации дефектов.

С точки зрения промышленности и трендов по цифровизации производства существует также и запрос на повышение автономности работы оборудования. В данном случае появляется необходимость в методах диагностики промышленного оборудования, которые будут реализованы в непрерывном автоматизированном режиме, с минимальным участием человека, с исключением возможности субъективной оценки и случайной ошибки. Существующие же подходы, требуют высокой степени человеческого присутствия. Хотя на данный момент и реализованы определенные системы автоматизированного контроля состояния оборудования, базирующиеся на виброанализе, но они не дают той степени универсальности, надежности и автономии, которая требуется на данный момент в промышленности.

Дополнительно подчеркнем другой запрос, сформулированный текущими потребностями промышленности. В условиях современных темпов развития техники, новые марки и типы оборудования появляются с все большей скоростью, соответственно становится все сложнее набирать многолетнюю опытную эмпирическую базу по работе оборудования и его дефектам. Таким образом, необходимо уже обслуживать и диагностировать оборудование без значительной опытной наработки. Отмечаем, что существующие методы диагностики, такие как параметрическая диагностика, анализ виброспектра, анализ шумового спектра, анализ смазки как раз и основываются именно на эмпирических данных – здесь опыт диагностики одного оборудования невозможно слепо перекладывать на другое. Значит, для удовлетворения современных потребностей промышленности необходимы универсальные и объективные методы диагностики, которые применимы одновременно для различных типов оборудования.

Итак, на основе вышесказанного заключаем следующие вызовы и задачи:

- 1) поиск новой исходной информации для диагностики оборудования; разработка метода диагностики на новых принципах;
- 2) задача автоматизации процесса диагностики; проведение ее непрерывно, без человеческого участия, с максимальной степенью объективности;
- 3) задача создания таких методов диагностики, которые будут универсальны, не требуют опытной наработки и которые применимы одновременно для различного оборудования.

1. Преимущества проведения совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров

Рассмотрим возможность проведения совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров, и какие могут быть преимущества. Достоинства и недостатки использования вибрационного спектра для диагностики состояния промышленного оборудования в принципе достаточно хорошо известны. Достоинствами является возможность идентификации определенных дефектов при наличии дефектных карт и реализуемость на очень широком перечне оборудования. Из недостатков – это необходимость стабильной работы оборудования иначе спектр будет искажен, отсутствие случайных ударов и вибрации; необходимость опытной наработки для составления дефектных карт; высокая субъективность при распознавании спектра, а, следовательно, трудность автоматизации.

Рассмотрим применение тензометрического спектрального анализа. В этом

случае исходными данными являются усилия в заданных точках оборудования, которые измеряются с высокой частотой, что позволяет формировать спектр. Измерения проводятся с помощью подкладных или накладных тензометрических датчиков. Использование тензометрического спектрального анализа позволяет получить ряд новых возможностей по сравнению с виброанализом. Такой анализ позволяет иметь более четкий спектр [8], менее склонен к искажению [9], позволяет определять местоположение дефекта, который создает возбуждения [10].

На основе разработанной пространственной математической модели можно получить точное положение источников колебания, иначе говоря, определить координату дефекта в пространстве: расположение в горизонтальной плоскости (в двух горизонтальных координатах) и координату по вертикали. Информация о расположении дефекта, его частоте и интенсивности колебания позволит максимально полно и точно идентифицировать дефект и определить степень его опасности по сравнению с только вибрационной диагностикой [10]. Также отмечаем, что анализ тензометрического спектра не требует значительной опытной наработки промышленного оборудования и специальной базы дефектов.

Однако авторский метод определения местоположения дефекта, описанный ранее в [10], имеют недостаток, который заключается в необходимости стабильной работы оборудования. Такой метод не позволяет определить случайные удары и дефекты, создающие нестабильную вибрацию.

Для устранения этих недостатков предлагается проведение совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров, который позволяет по анализу времени распространения ударных импульсов распознать расположение дефекта.

2. Реализация совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров

Для реализации совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров необходимо установить тензодатчики на углах оборудования. Их можно установить или под опорами оборудования или использовать накладные тензодатчики, смонтировав на раме оборудования.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан электронный блок, к которому подключаются тензометрические и вибрационные датчики. В качестве первых использовались резистивные тензодатчики, установленные под углами лабораторной установки, а в качестве вибрационного датчика использовался трёхосевой пьезоакселерометр на базе микросхемы ADXL335. Таким образом, измерялись данные одновременно по 7 каналам, обеспечивая минимальную задержку между двумя измерениями в 11,1 микросекунд.

Информация обрабатывалась на компьютере с использованием специально разработанной для этих целей программе, реализованной на языке Python.

На рис. 1 показала лабораторная установка с установленными датчиками.

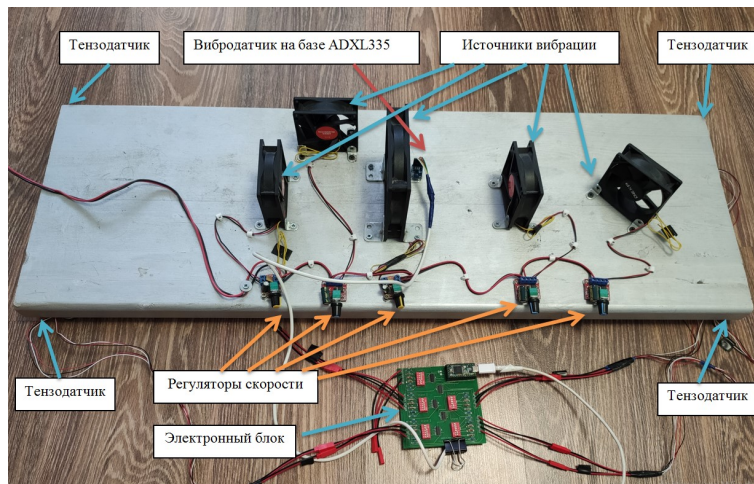


Рис. 1. Лабораторная установка с установленными датчиками

3. Использование совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров для локализации одиночных импульсов

Рассмотрим, как использование контроля тензометрического сигнала (в том числе и с использованием вибродатчиков) позволяет отслеживать источники отдельных импульсов. Это актуально в разрезе нестабильной работы оборудования и наличия источников случайной вибрации, поскольку спектральный анализ для таких случаев будет искаженным.

Определение местоположения источника возможно при помощи измерения сигнала с высокой частотой, такой, что позволит определить момент достижения импульса до каждого из датчиков. Далее на основе системы, представленной ниже, определяются координаты источника.

$$\begin{cases} t_a = \frac{1}{v} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + t_0 \\ t_b = \frac{1}{v} \sqrt{(L_x - x)^2 + y^2 + z^2} + t_0 \\ t_c = \frac{1}{v} \sqrt{(L_x - x)^2 + (L_y - y)^2 + z^2} + t_0 \\ t_d = \frac{1}{v} \sqrt{x^2 + (L_y - y)^2 + z^2} + t_0 \\ t_i = \frac{1}{v} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + t_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где t_a, t_b, t_c, t_d – время достижения импульса до тензодатчиков соответственно с индексами a, b, c, d ; t_i – время достижения импульса до i -го вибродатчика; v – скорость распространения волны в материале оборудования; x, y, z – координаты источника импульса; x_i, y_i, z_i – координаты i -го вибродатчика; t_0 – время начала отсчета.

При решении данной системы уравнений можно принимать, что скорость распространения волны в материале оборудования неизвестна, тогда имеем пять неизвестных, соответственно достаточно 5 уравнений, и необходимо установить хотя бы 1 вибродатчик помимо 4 тензодатчиков. С другой стороны, можно принять, что оборудование изготовлено из стали с известной скоростью распространения волн в ней, тогда будет достаточно 4 уравнения, то есть 4 тензодатчиков. Однако добавление большего количества датчиков позволит обеспечить решение с большей точностью.

С учетом естественной погрешности строгое решение в ряде случаев может не получиться. Также следует учитывать, если количество датчиков больше минимально необходимого количества. Соответственно, необходимо применение численных

приближенных методов решения. Предлагается решение через минимизацию целевой функции:

$$\begin{aligned} \Phi = & (t_a - \frac{1}{v}\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - t_0)^2 + (t_b - \frac{1}{v}\sqrt{(L_x - x)^2 + y^2 + z^2} - t_0)^2 + \\ & + (t_c - \frac{1}{v}\sqrt{(L_x - x)^2 + (L_y - y)^2 + z^2} - t_0)^2 + (t_d - \frac{1}{v}\sqrt{x^2 + (L_y - y)^2 + z^2} - t_0)^2 + \\ & + \sum_i (t_i - \frac{1}{v}\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - t_0)^2 \rightarrow \min \end{aligned} \quad (2)$$

Далее определяется минимум данной функции, и значения координат источника x, y, z , при которых данный минимум достигается. Это и будет являться расположением источника импульса.

4. Экспериментальное исследование совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров для локализации одиночных импульсов

В ходе экспериментальных исследований производился короткий удар с помощью тонкого металлического стержня по поверхности лабораторной установки для имитации источника случайной вибрации или случайного импульса. На рис. 2 приведены сведения о сигнале с каждого из тензодатчиков. Удар проводился по точке с координатами $x = 0,02$ м, $y = 0,02$ м. Графики были построены при помощи библиотеки Matplotlib Python.

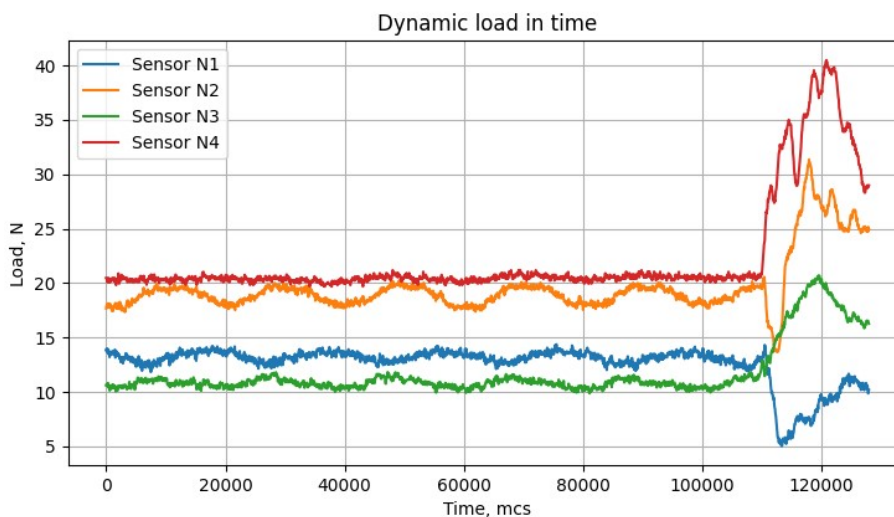


Рис. 2. Динамическая нагрузка для каждого из тензодатчиков во времени

На рис. 2 отчетливо виден момент удара. Тем не менее, необходим алгоритм для автоматической идентификации момента достижения импульса до датчика. Для этого предлагается отслеживание первой производной сигнала. Для рассмотренного случая на рис. 3 приведен соответствующий график.

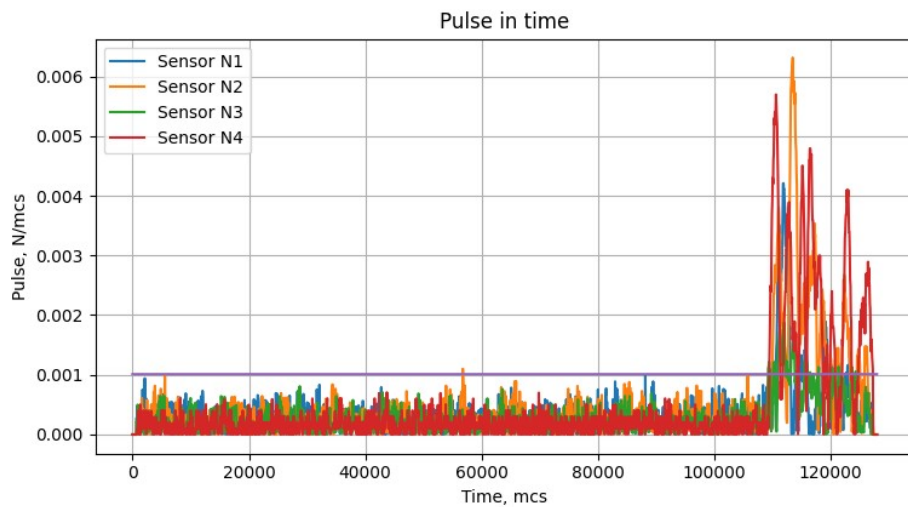


Рис. 3. Первая производная динамической нагрузки для каждого из тензодатчиков во времени

Как видно из рис. 3, отслеживание момента импульса с помощью анализа первой производной динамической нагрузки более наглядно. Определим критерий, который позволит отличить резкой рост сигнала от шума. Предлагается использовать критерий по следующей структуре:

$$R_{critical} = R_{average} + k\sigma, \quad (3)$$

где $R_{critical}$ - критическое значение первой производной динамической нагрузки, $R_{average}$ - соответственно среднее значение, σ - среднеквадратичное отклонение первой производной динамической нагрузки. Из теории вероятностей следует, что если $k = 2$, то шум фильтруется с вероятностью 95%; если $k = 3$, то шум фильтруется с вероятностью 99,7%. Для экспериментального исследования принимается $k = 2$. Соответствующая линия, определяющая критическое значение, показана на рис. 4.

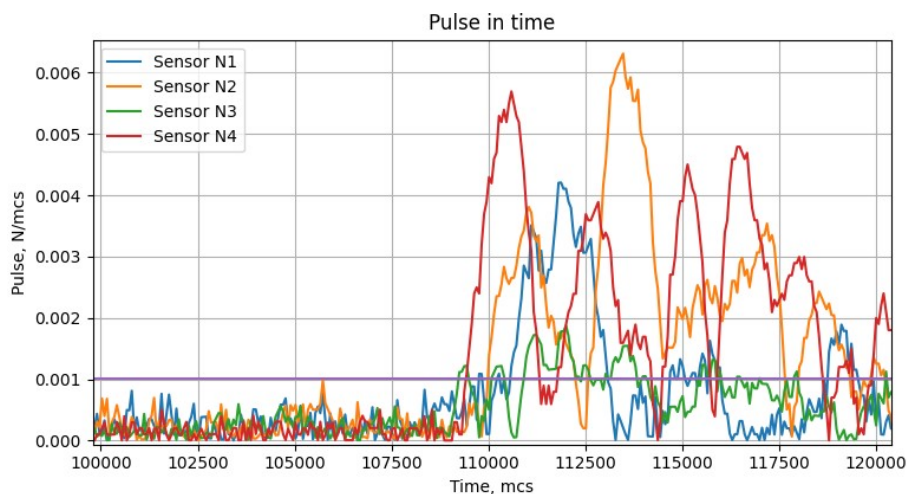


Рис. 4. Первая производная динамической нагрузки для каждого из тензодатчиков во времени (увеличенный масштаб)

При обработке данных получено, что импульс достигает датчиков соответственно в моменты времени 110144, 110080, 109376 и 109568 мкс. Численное решение уравнения (2) с использованием библиотеки Numpy Python позволяет получить координаты $x = 0,03143$

и $y = 0,04389$ (приведенная погрешность составляет 3,81% и 2,65% соответственно).
 Результаты других экспериментов сведены в таблицу 1 и приведены на рис. 5.

Таблица 1

Расчетное и фактическое местоположение источников импульса

Номер эксперимента	Действительное расположение источника импульса			Расчитанное расположение источника импульса		
	x, м	y, м	z, м	x, м	y, м	z, м
1	0,02	0,02	0,04	0,035	0,030	0,041
2	0,15	0,02	0,04	0,143	0,009	0,039
3	0,15	0,45	0,04	0,161	0,461	0,038
4	0,15	0,85	0,04	0,147	0,836	0,042

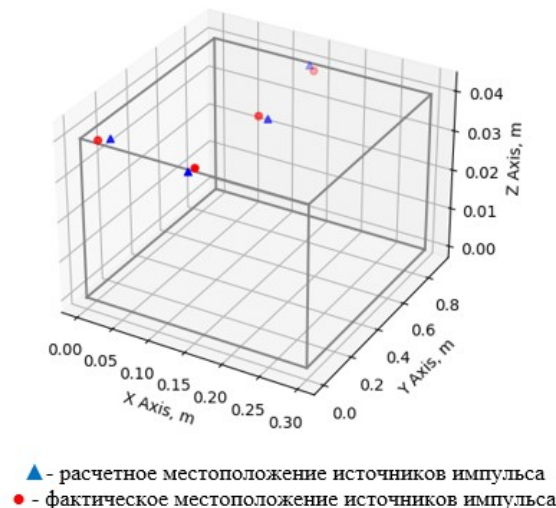


Рис. 5. Расчетное и фактическое местоположения источников импульса

Отмечаем, что приведенная погрешность определения местоположения составила не более 5%.

Заклучение

В данной работе представлена концепция использования совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров для диагностики промышленного оборудования и локализации его дефектов. Приведена методика локализации отдельных импульсов и источников случайной вибрации с использованием тензометрических и вибрационных датчиков. Выполнены экспериментальные исследования, согласно которым по различным точкам лабораторной установки наносятся легкие удары. Местоположение рассчитывалось на основе триангуляции исходя из алгоритма, реализованного на Python, согласно которому импульс движется во все стороны с одинаковой скоростью, равной скорости распространения волн в материале. Далее программа фиксирует время достижения до каждого из датчиков по резкому изменению сигнала, составляет систему линейных уравнений и производит расчет. По результатам эксперимента установлено, что местоположение дефекта определяется с достаточной точностью.

Представленная концепция использования совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров позволит идентифицировать дефекты промышленного оборудования с большей точностью и обеспечить его работу с высокой надежностью и долговечностью.

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ МК-1188.2021.4.

Список литературы

1. Sullivan G.P., Pugh R., Melendez A.P., Hunt W.D.: Operations & Maintenance Best Practices. Release 2.0. A Guide to Achieving Operational Efficiency U.S. Department of Energy, 2004.
2. Muszynska A. Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions, International journal of rotating machinery. – 1994. – Vol. 1. - p. 237-266.
3. Scanlon P. Residual life prediction of rotating machines using acoustic noise signals / Scanlon P., Kavanagh D. F., and Boland F. M. // IEEE transactions on instrumentation and measurement. – 2012. - Vol. 62(1). - pp. 95-108.
4. Zeng X. Contact Stress Calculation for Lubrication State Determination of Ball Bearings / Zeng X., Liu H., Mo Z., Wang J. and Miao Q. // Prognostics and system health management conference (PHM-Chongqing), Chongqing, 2018. - p. 953-957.
5. Wang K. Condition monitoring on grease lubrication of rolling bearing using AE technology / Wang K., Liu X., Wu X. and Zhu Z. // 9th International conference on modeling, identification and control (ICMIC), Kunming. 2017. - pp. 595-599.
6. ASTM D6595-00: "Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry"
7. Henaо H. Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques / Henaо H., Capolino G.A., Fernandez-Cabanас M. // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014 – No. 8(2). – pp. 31-42.
8. Валеев А.Р. Применение анализа тензометрических сигналов для диагностики подшипников перекачивающего оборудования / Валеев А.Р., Харисов А.А., Харрасов Б.Г. // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. – № 1. – С. 5–8.
9. Валеев А.Р. Разработка метода определения геометрического положения дефектов перекачивающего оборудования с применением удаленной тензометрии / А.Р. Валеев, Б.Н. Мастобаев, Р.М. Каримов, Р.Р. Ташбулатов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. – № 3. – С. 11–15.
10. Валеев А.Р. Апробация метода определения геометрического положения множественных дефектов перекачивающего оборудования с применением удаленной тензометрии / А.Р. Валеев, Б.Н. Мастобаев, Р.М. Каримов, Р.Р. Ташбулатов, Харрасов Б.Г. // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 4. – С. 5–10.

References

1. Sullivan G.P., Pugh R., Melendez A.P., Hunt W.D.: Operations & Maintenance Best Practices. Release 2.0. A Guide to Achieving Operational Efficiency U.S. Department of Energy, 2004.

2. Muszynska A. Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions, International journal of rotaring machinery. – 1994. – Vol. 1. - p. 237-266.
3. Scanlon P. Residual life prediction of rotating machines using acoustic noise signals / Scanlon P., Kavanagh D. F., and Boland F. M. // IEEE transactions on instrumentation and measurement. – 2012. - Vol. 62(1). - pp. 95-108.
4. Zeng X. Contact Stress Calculation for Lubrication State Determination of Ball Bearings / Zeng X., Liu H., Mo Z., Wang J. and Miao Q. // Prognostics and system health management conference (PHM-Chongqing), Chongqing, 2018. - p. 953-957.
5. Wang K. Condition monitoring on grease lubrication of rolling bearing using AE technology / Wang K., Liu X., Wu X. and Zhu Z. // 9th International conference on modeling, identification and control (ICMIC), Kunming. 2017. - pp. 595-599.
6. ASTM D6595-00: "Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry".
7. Henaо H. Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques / Henaо H., Capolino G.A., Fernandez-Cabanас M. // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014 – No. 8(2). – pp. 31-42.
8. Valeev A. R. Application of the analysis of tensometric signals for diagnostics of bearings of pumping equipment / Valeev A.R., Kharisov A.A., Kharrasov B.G. // Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials. 2020. - No. 1. - pp. 5-8.
9. Valeev A. R. Development of a method for determining the geometric position of defects in pumping equipment with the use of remote tensometry / A.R. Valeev, B.N. Mastobaev, R.M. Karimov, R.R. Tashbulatov // Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials. 2019. - No. 3. - pp. 11-15.
10. Valeev A. R. Approbation of the method for determining the geometric position of multiple defects of pumping equipment with the use of remote tensometry / A.R. Valeev, B.N. Mastobaev, R.M. Karimov, R.R. Tashbulatov, B.G. Kharrasov // Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials. - 2019. - No. 4. - pp. 5-10.