

УДК 33

DOI: 10.34670/AR.2021.21.50.008

**Повышение энергетической безопасности предприятий
ТЭК за счет внедрения технической диагностики оборудования
с применением непрерывной тензометрии**

Валеев Анвар Рашитович

Кандидат технических наук, доцент,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450064, Российская Федерация, Уфа, ул. Космонавтов, 1;
e-mail: anv-v@yandex.ru

Баймурзина Энже Ямилевна

Студент,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
450064, Российская Федерация, Уфа, ул. Космонавтов, 1;
e-mail: enji2301@gmail.com

Ташбулатов Радмир Расулевич

Кандидат технических наук, доцент,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450064, Российская Федерация, Уфа, ул. Космонавтов, 1;
e-mail: tashbulatovradmir@gmail.com

Мастобаев Борис Николаевич

Доктор технических наук, профессор,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
450064, Российская Федерация, Уфа, ул. Космонавтов, 1;
e-mail: mastoba@mail.ru

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ МК-1188.2021.4.

Аннотация

Статья посвящена новому методу обнаружения дефектов в перекачивающем оборудовании и его применению для повышения энергетической безопасности топливно-энергетического комплекса. Традиционные методы диагностики оборудования обладают значительной степенью субъективности. Современные требования к методам контроля технического состояния и обнаружения дефектов заключаются в высокой точности, надежности, автоматизации и возможности использования для различных типов машин. В данном исследовании предлагается использовать метод обнаружения дефектов в промышленном оборудовании с использованием непрерывного анализа данных

тензометрических датчиков. В соответствии с этим методом амплитуды и фазы динамической реакции на опорах непрерывно измеряются тензодатчиками. Затем, используя полученные формулы, можно рассчитать точное положение дефекта. В данном исследовании этот метод проверяется программным обеспечением Ansys для различных дефектов нефтеперекачивающего агрегата. Такой метод может дать новые возможности для обеспечения более точного и надежного мониторинга технического состояния и выявления дефектов.

Для цитирования в научных исследованиях

Валеев А.Р., Баймурзина Э.Я., Ташбулатов Р.Р., Мастобаев Б.Н. Повышение энергетической безопасности предприятий ТЭК за счет внедрения технической диагностики оборудования с применением непрерывной тензометрии // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Том 11. № 4А. С. 76-85. DOI: 10.34670/AR.2021.21.50.008

Ключевые слова

Диагностика, техническое состояние, тензометрия, тензодатчик, вибродиагностика, нефтеперекачивающий агрегат, энергетическая безопасность.

Введение

Энергетическая безопасность и эффективность работы предприятий топливно-энергетического комплекса напрямую зависит от надежности работы его оборудования. Для его обеспечения используется техническая диагностика. Диагностирование нефтегазоперекачивающего оборудования, в том числе разработка новых методов диагностики, повышения надежности, является важной задачей нефтегазовой отрасли. Это подтверждается тем, что повышение надежности и безопасности производственного оборудования входит в Программу инновационного развития ПАО «Газпром», а определение ресурса основного механо-энергетического оборудования, в том числе поэлементное, создание систем мониторинга его технического состояния с целью совершенствования конструкций, определения оптимальных сроков технического обслуживания и ремонта, является одной из задач научно-практической деятельности ПАО «Транснефть».

Основное содержание

Касательно диагностики упомянутых крупных машин в нефтяной отрасли, стоит отметить, что в большинстве своем они оборудуются только стационарными системами контроля работы оборудования, но не стационарными системами диагностики. Например, согласно руководящему документу ПАО «Транснефть» РД-08.00-60.30.00-КТН-016-1-05 «Руководство по техническому обслуживанию и ремонту оборудования и сооружений нефтеперекачивающих станций» в непрерывном режиме в обязательном порядке производится только параметрическая диагностика и оперативный контроль работоспособности оборудования по вибрационным параметрам. При этом, согласно упомянутому руководящему документу, производится контроль среднеквадратичного значения виброскорости скорости изменения вибрации относительно предыдущих, и делается вывод только об общем вибросостоянии насосного

агрегата. При параметрической диагностике производится оценка работоспособности магистральных и подпорных насосов по эксплуатационным параметрам основывается на сравнении паспортных и базовых характеристик (параметров) напора, КПД, допустимого кавитационного запаса с фактическими эксплуатационными. В совокупности оба метода представляют только общую информацию и состоянии насосного агрегата и не позволяют проводить его диагностику.

Переносные системы диагностики применяются только при плановом или внеплановом диагностическом контроле. Плановый контроль производится с периодичностью 2100-2500 часов или перед и после ремонтов, а внеплановый контроль производится при значительном росте вибрации или появлении очевидных признаков дефектов. В совокупности это не позволяет в оперативном режиме качественно производить диагностирование насосного агрегата. Аналогичная ситуация на других предприятиях.

Касательно спектральной вибродиагностики, применяемой в переносной системе диагностике, то данный метод имеет ряд недостатков, обусловленных как применением непосредственно датчиков вибрации, так и их строго заданным расположением в определенных точках. Соответственно, появляются следующие негативные обстоятельства:

- Датчики вибрации измеряют уровень вибрации не в самом источнике вибрации, а на некотором расстоянии от него на поверхности корпуса оборудования. Соответственно датчик вибрации измеряет уровень вибрации в точке, отличной от необходимой;
- Процесс передачи сигнала от источника вибрации в точку установки датчика происходит с искажением и модуляцией;
- Вибродиагностика характеризуется значительным уровнем шума.
- Значения амплитуд вибрации на заданных частотах и полосах часто являются непостоянными, что «смазывает» общую картину вибрационного спектра.

В связи с этим вибрационная диагностика не является четко исполняемой и зависит от профессионализма специалиста, который ее проводит. Более того, для создания информационной базы по соответствию дефектных признаков определенным дефектам требуется значительное время для ее наработки, причем опыт эксплуатации одного типа оборудования невозможно однозначно перенести на другой тип. Таким образом, различное оборудование требует индивидуальные дефектные карты для идентификации дефектов, при этом в некоторых случаях даже агрегаты одного типа иногда могут иметь различные пороговые значения по конкретным дефектам.

Другими традиционными методами обнаружения дефектов и контроля технического состояния, применяемыми в других отраслях промышленности, являются следующие.

Ультразвуковой метод используется при выключенном оборудовании. Также данный метод не позволяет определить размер обнаруженного дефекта.

Вихретоковый метод основан на регистрации изменения взаимодействия собственного электромагнитного поля катушки с электромагнитным полем вихревых токов, индуцируемых этой катушкой в контролируемой. Для анализа подходят только проводящие материалы. Дефекты, расположенные параллельно датчику дефектоскопа, могут быть не обнаружены.

Тепловой метод сильно зависит от окружающей среды и погодных условий и обеспечивает высокую погрешность.

Радиационный метод имеет низкую скорость обнаружения дефектов поверхности, и его

очень трудно обеспечить автоматически.

Другим методом диагностики является анализ состояния масла.

Методы диагностики электродвигателя по электрическим параметрам и электромагнитным полям позволяют анализировать состояние электродвигателя и некоторые общие параметры всего агрегата (например, дисбаланс). Однако дефекты в другой части оборудования не может быть обнаружены.

Таким образом, очень трудно найти метод, который может полностью соответствовать всем современным требованиям мониторинга технического состояния оборудования. Существующие методы используют косвенное определение дефектов на основе опыта эксплуатации оборудования.

Также на данный момент не существует методов, позволяющих определять местонахождение дефекта в пространстве, идентифицировать дефект и определять степень его опасности не на основе экспериментальных или эмпирических данных, а на основе точного и фундаментального анализа.

Таким образом, используемые в настоящее время методы не позволяют в полной мере оценить техническое состояние оборудования. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что методы, используемые в настоящее время для оценки технического состояния оборудования, практически достигли предела своей применимости для диагностики нефтегазового насосного оборудования. Для качественного совершенствования технической диагностики нефтегазоперекачивающего оборудования необходимо разработать новые подходы, использующие исходную информацию иной физической природы.

В дополнение к существующим методам диагностики предлагается новый подход. Он позволяет объективно определять местоположение источников вибрации с помощью непрерывного тензометрического анализа. Метод основан на следующей идее: дефект, или в общем случае возбуждающая сила, вызывает микроперемещения оборудования. Их можно разделить на продольные и вращательные. Микроперемещения вызывают динамические реакции на опорах оборудования, но из-за вращательных движений оборудования динамическая реакция на опорах возникает не одновременно. Это означает, что динамические реакции на опорах имеют разную фазу.

Амплитуды и фазы динамической реакции на опорах могут быть измерены тензометрическими датчиками, усилителями и микроконтроллерами. Под опорами оборудования размещены тензодатчики, которые позволяют определять динамические реакции на опоры в режиме реального времени. Если их установить невозможно, можно использовать тензодатчики, закрепленные на поверхности опоры или рамы оборудования. Такое измерение с помощью этого оборудования показано в предыдущих исследованиях автора [Валеев, 2019], в которых показано, что с инструментальной точки зрения отсутствуют проблемы измерений амплитуд и фаз динамической реакции на опорах лабораторного стенда. Целью же этого исследования является моделирование применения метода для промышленного оборудования, и проверить, и оценить его точность.

Подробный вывод формул представлен в [Valeev, 2020], поэтому здесь представлены только окончательные формулы для расчета координат возбуждающей силы.

Горизонтальная координата точки приложения возбуждающей силы или дефекта (расстояние от опоры А) равна:

$$L_{xA} = L_x \frac{R_{xB} \cos(\varphi_{xB} - \varphi_F)}{R_{xA} \cos(\varphi_{xA} - \varphi_F) + R_{xB} \cos(\varphi_{xB} - \varphi_F)} \quad (1)$$

где φ_A – фаза колебаний реакции опоры А; φ_B – фаза колебаний реакции опоры В; φ_F – фаза колебаний суммы реакций в опорах А и В; R_A – амплитуда отклика в опоре А; R_B – амплитуда реакции в опоре В; F – амплитудная сила источника возбуждения; x и z – горизонтальные координаты; y – вертикальная координата.

Аналогично, положение источника возбуждения или дефекта вдоль оси z (горизонтальная ось, перпендикулярная оси x) определяется как:

$$L_{zA} = L_z \frac{R_{zB} \cos(\varphi_{zB} - \varphi_F)}{R_{zA} \cos(\varphi_{zA} - \varphi_F) + R_{zB} \cos(\varphi_{zB} - \varphi_F)} \quad (2)$$

Высота источника возбуждения или дефекта, т. е. координата y , равна:

$$H = \frac{R_{xA} L_x \cos(\varphi_{xA} - \varphi_F)}{F_x} \quad (3)$$

Итак, получены формулы для расчета трехмерного положения дефекта.

Для верификации метода обнаружения дефектов промышленного оборудования по данным тензометрических датчиков и проверки формул (1) – (3) предлагается использовать программу ANSYS. Эта программа с модулем «Harmonic response» позволяет моделировать вибрацию оборудования под действием силы вращения и изучать отклики на опоры. В результате могут быть измерены значения амплитуды и фазы динамических сил.

Нефтяной насос 12НДс-НМ представляет собой горизонтальную установку с центробежным одноступенчатым насосом с двухсторонним входом, предназначенную для перекачки нефтепродуктов (сырой нефти, автомобильного бензина, авиационного бензина, дизельного топлива) и воды с примесями нефтепродуктов. Расход - 1250 м³/ч. Масса насоса - 1200 кг. Частота вращения - 1450 об / мин.

В данном исследовании моделируется наличие следующих дефектов в этом насосном агрегате:

- эксцентриситет рабочего колеса насоса;
- эксцентриситет муфты;
- эксцентриситет ротора электропривода;
- дефекты подшипника насоса;
- дефекты электропривода;
- нежесткий монтаж (дефект «мягкая лапа»).

Например, в случае эксцентриситета муфты, предполагается, что эксцентриситет имеет радиус 1,73 мкм, ротор имеет массу 120 кг, и, следовательно, вращающая сила, действующая на насосный агрегат, равна 1,2 Н. Дефект расположен на оси вала насоса с координатами $x = 347$ мм; $z = 1250$ мм; $y = H = 870$ мм.

Предусмотрено компьютерное моделирование с помощью модуля ANSYS Harmonic Response.

Для применения формул (1) – (3) необходимо измерить не только амплитудную и фазовую характеристику на опоре, но и значения в парах опор, а также значения для всех четырех опор. Предполагается, что в нулевой момент времени вращающая сила направлена вверх. В качестве примера полученные результаты для эксцентриситета муфты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Амплитуды силы и фаз динамических сил на опорах оборудования, создаваемые за счет эксцентриситета муфты

Опора	Амплитуда динамической силы, Н	Фаза, рад
Опора 1	1,743	1,3516
Опора 2	1,749	-1,3520
Опора 3	2,250	-1,2824
Опора 4	2,250	1,2829
Опора 1+2, т.е. R_{zA}	0,38	-0,0076
Опора 3+4, т.е. R_{zB}	0,64	0,0001
Опора 1+4, т.е. R_{xA}	1,995	1,3129
Опора 2+3, т.е. R_{xB}	1,998	-1,3129
Суммарная реакция всех опор вдоль вертикальной оси	1,0186	-0,0028
Суммарная реакция всех опор вдоль оси x	0,3675	-0,4199

Затем применяются формулы (1) – (3). Результаты расчетов для всех моделируемых дефектов представлены в таблице 2. Погрешность рассчитывается относительно габаритов насосного агрегата, которые равны $L_x=1000$ мм, $L_y = 1342,5$ мм, $L_z=2420$ мм.

Таблица 2 - Сравнение смоделированного и расчетного местоположения дефектов оборудования

Дефект	Координата X			Координата Z			Координата Y (высота)			Средняя приведенная погрешность, %
	Смоделированное положение, мм	Расчитанное положение, мм	Приведенная погрешность, %	Смоделированное положение, мм	Расчитанное положение, мм	Приведенная погрешность, %	Смоделированное положение, мм	Расчитанное положение, мм	Приведенная погрешность, %	
Эксцентриситет рабочего колеса насоса	347	356,85	0,99%	450	475,22	1,04%	870	876,59	0,49%	0,84%
Эксцентриситет муфты	347	336,18	1,08%	1250	1249,58	0,02%	870	883,16	0,98%	0,69%
Эксцентриситет ротора электропривода	347	337,94	0,91%	1700	1720,08	0,83%	870	873,36	0,25%	0,66%
Дефект подшипника насоса А	347	349,82	0,28%	70	54,17	0,65%	870	862,38	0,57%	0,50%
Дефект подшипника насоса В	347	344,02	0,30%	900	923,76	0,98%	870	881,32	0,84%	0,71%

Дефект	Координата X			Координата Z			Координата Y (высота)			Средняя приведенная погрешность, %
	Смоделированное положение, мм	Расчитанное положение, мм	Приведенная погрешность, %	Смоделированное положение, мм	Расчитанное положение, мм	Приведенная погрешность, %	Смоделированное положение, мм	Расчитанное положение, мм	Приведенная погрешность, %	
Дефекты электропривода А	347	352,30	0,53%	1450	1447,05	0,12%	870	868,61	0,10%	0,25%
Дефекты электропривода В	347	350,78	0,38%	2150	2145,66	0,18%	870	860,24	0,73%	0,43%
Нежесткий монтаж А	50	50,49	0,05%	50	45,61	0,18%	0	-5,56	0,41%	0,22%
Нежесткий монтаж В	644	641,36	0,26%	50	46,04	0,16%	0	-4,94	0,37%	0,27%
Нежесткий монтаж С	644	631,51	1,25%	1990	1981,48	0,35%	0	-4,26	0,32%	0,64%
Нежесткий монтаж D	50	46,74	0,33%	1990	2014,88	1,03%	0	-12,45	0,93%	0,76%
Среднее	-	-	0,58%	-	-	0,50%	-	-	0,54%	0,54%

Как видно из таблицы, вычисленные координаты очень близки к местоположению смоделированных дефектов. Средняя погрешность равна 0,54%, что показывает работоспособность предлагаемого метода.

Заключение

В данной статье предлагается и исследуется новый метод идентификации дефектов, который позволяет определить их точное местоположение. Метод основан на расчете координаты дефекта с использованием информации о динамических силах и их фазе в опорах в оборудовании – это можно сделать с помощью тензометрических датчиков и непрерывного мониторинга. В целом, метод дает информацию о местоположении дефекта, частоте возникновения дефекта и его интенсивности. Результаты, полученные в результате компьютерного моделирования с помощью анализа ANSYS Harmonic Response, показывают, что можно определить силу возбуждения с высокой точностью – с погрешностью менее 1%. Такой метод может дать новые возможности для обеспечения более точного и надежного мониторинга технического состояния и выявления дефектов, что позволит повысить энергетическую безопасность и эффективность работы предприятий топливно-энергетического комплекса.

Библиография

1. РД-08.00-60.30.00-КТН-016-1-05 «Руководство по техническому обслуживанию и ремонту оборудования и сооружений нефтеперекачивающих станций»
2. Sullivan G.P., Pugh R., Melendez A.P. and Hunt W.D. Operations & Maintenance. Best Practices. Release 2.0. A Guide to Achieving Operational Efficiency. U.S. Department of Energy, 2004
3. 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.

4. Petukhov V. Diagnostics of the state of electric motors. The method of spectral analysis of current consumption // News of Electrical Engineering, 1 (31), 2005.
5. Filippetti F., Bellini A. and Capolino G.A. Condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: State of art and future perspectives // Proceeding of the Conference: Electrical Machines Design Control and Diagnosis, 2013
6. Ishibashi T., Han B., and Kawai T. Rotating Machinery Library for Diagnosis // Proceedings of the 12th International Modelica Conference. Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017.
7. 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. DOI: 10.24411/0131-4270-2019-10302
8. 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. DOI: 10.24411/0131-4270-2019-10401
9. Valeev A. Method of Defect Identification of Industrial Equipment via Remote Strain Gauge Analysis // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Сочи, Россия, 2020, pp. 362-367, DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208183

**Improving the energy security of fuel and energy complex enterprises
through the introduction of a method of technical diagnostics of equipment
using continuous strain measurement**

Anvar R. Valeev

PhD in Technical Sciences
Associate Professor

Ufa State Petroleum Technical University
450064, 1, Kosmonavtov str., Ufa, Russian Federation;
e-mail: anv-v@yandex.ru

Enzhe Ya. Baimurzina

student

Ufa State Petroleum Technical University
450064, 1, Kosmonavtov str., Ufa, Russian Federation;
e-mail: enji2301@gmail.com

Radmir R. Tashbulatov

PhD in Technical Sciences
Associate Professor

Ufa State Petroleum Technical University
450064, 1, Kosmonavtov str., Ufa, Russian Federation;
e-mail: tashbulatovradmir@gmail.com

Boris N. Mastobaev

Doctor of Technical Sciences

Professor

Ufa State Petroleum Technical University

450064, 1, Kosmonavtov str., Ufa, Russian Federation;

e-mail: mastoba@mail.ru

Abstract

The article is devoted to a new method for detecting defects in pumping equipment and its application to improve the energy security of the fuel and energy complex. Traditional methods of equipment diagnostics have a significant degree of subjectivity. Modern requirements for methods of monitoring the technical condition and detecting defects are high accuracy, reliability, automation and the possibility of use for various types of machines. In this study, it is proposed to use a method for detecting defects in industrial equipment using continuous analysis of strain gauge sensor data. In accordance with this method, the amplitudes and phases of the dynamic reaction on the supports are continuously measured by load cells. Then, using the obtained formulas, it is possible to calculate the exact position of the defect. In this study, this method is tested by the Ansys software for various defects of the oil pumping unit. This method can provide new opportunities for providing more accurate and reliable monitoring of the technical condition and detecting defects.

For citation

Valeev A.R., Baimurzina E.Ya., Tashbulatov R.R., Mastobaev B.N. (2021) Povyslenie energeticheskoi bezopasnosti predpriyatii TEK za schet vnedreniya tekhnicheskoi diagnostiki oborudovaniya s primeneniem nepreryvnoi tenzometrii [Improving the energy security of fuel and energy complex enterprises through the introduction of a method of technical diagnostics of equipment using continuous strain measurement]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 11 (4A), pp. 76-85. DOI: 10.34670/AR.2021.21.50.008

Keywords

Diagnostics, technical condition, strain gauge, load cell, vibration diagnostics, oil pumping unit, energy security.

References

1. RD-08.00-60.30.00-KTN-016-1-05 "Manual for maintenance and repair of equipment and structures of oil pumping stations"
2. Sullivan G. P., Pugh R., Melendez A. P. and Hunt V. D. Operation and maintenance. Best Practices. Issue 2.0. Guide to Achieving Operational Efficiency. US Department of Energy, 2004
3. ASTM D6595-00 Standard Test Method for the Determination of Wear Metals and Contaminants in Spent Lubricating Oils or Spent Hydraulic Fluids using Atomic Emission Spectrometry with a Rotating Disk Electrode.
4. Petukhov V. Diagnostics of the state of electric motors. Method of spectral analysis of current consumption // News of electrical engineering, 1 (31), 2005.
5. Filippetti F., Bellini A. and Capolino G. A. Monitoring of the state and diagnostics of rotor malfunctions in asynchronous machines: current state and prospects for the future // Materials of the conference: Control and diagnostics of design of electric machines, 2013
6. Ishibashi T., Han B. and Kawai T. Library of rotating machines for diagnostics // Materials of the 12th International Conference Modelica. Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017.

7. Valeev A. R. Development of a method for determining the geometric position of defects in pumping equipment using remote strain measurement / 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. DOI: 10.24411/0131-4270-2019-10302
8. Valeev A. R. Approbation of the method for determining the geometric position of multiple defects of pumping equipment using remote strain measurement / A. R. Valeev, B. N. Mastobaev, R. M. Karimov, R. R. Tashbulatov, Kharrasov B. G. // Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials. 2019. No. 4. pp. 5-10. DOI: 10.24411/0131-4270-2019-10401
9. Valeev A. Method of identifying defects in industrial equipment using remote strain analysis // International Russian Conference on Automation (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2020, pp. 362-367, DOI: 10.1109/RusAutoCon49822. 2020. 9208183