

На отечественных крупных предприятиях наблюдается слабое взаимодействие, а иногда и противостояние со стороны службы главного механика, главного технолога и производства при внедрении новых информационных систем в силу различия целевых показателей и ресурсов. При этом только согласованная работа производственных служб позволяют воспользоваться современными технологиями в полной мере и получить качественный скачек уровня ТОиР.

#### Список литературы

1. *Вибрации в технике*. Том 5. М. Машиностроение, 1981 г., стр. 380–418.
2. *Русов В.А.* Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь, ПФВ «Вибро-Центр». 2012.
3. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ. Гос. издат. физ-мат литературы. М. 1962.
4. *Дж. Бендат, А. Пирсол.* Прикладной анализ случайных данных. М. Изд. Мир. 1989.

*Шляев Сергей Николаевич* – генеральный директор ЗАО «Руднев-Шляев»,  
*Третьяков Игорь Вячеславович* – директор по развитию ООО «Экстенсив».  
 Контактный телефон +7 (912) 220-8-220.  
 E-mail: Live@x-tensive.ru

## СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Е.А. Кудрявцев, Л.А. Лось, В.И. Пронякин (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

*Рассмотрены методы технической диагностики насосного оборудования трубопроводного транспорта. Представлен отраслевой подход на базе вибродиагностических методов. Приводятся международные стандарты, переведенные для применения в отечественной промышленности, отражающие традиционные подходы к диагностике машин и механизмов. Представлен фазохронометрический метод диагностики циклических машин и механизмов.*

*Ключевые слова:* техническая диагностика, циклические механизмы, насосное оборудование, вибродиагностика, диагностические признаки, фазохронометрический метод.

На современном этапе развития экономики трубопроводный транспорт, являясь важнейшей составной частью транспортной системы России, играет значительную роль в обеспечении отечественной экономики топливно-энергетическими ресурсами. Экономическая эффективность и надежность доставки нефти из районов добычи в районы переработки являются основными критериями оценки функционирования трубопроводного транспорта. Отказы на магистральных нефтепроводах (МН) приводят к полному или частичному прекращению перекачки, нарушают нормальную работу промыслов, нефтеперерабатывающих заводов и нефтебаз. Аварии на МН, сопровождающиеся разливами нефти, наносят значительный ущерб окружающей среде, способны привести к взрывам и пожарам с катастрофическими последствиями. По этой причине реализация надежной безаварийной работы МН является одной из основных задач при эксплуатации.

Для надежной и безаварийной работы насосных агрегатов (НА) разработан ряд методов диагностики их функционирования, основными из которых являются вибродиагностика и параметрическая диагностика.

#### Традиционные методы диагностики НА

Существующие подходы к решению задач технической диагностики методически представлены в международных стандартах, переведенных для применения в отечественной промышленности в виде ГОСТ:

— ГОСТ Р ИСО 13379-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Руководство по интерпретации данных и методам диагностирования;

— ГОСТ Р ИСО 17359-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство;

— ГОСТ 30848-2003. Диагностирование машин по рабочим характеристикам. Общие положения.

В этих документах изложены методы и процедуры сбора и интерпретации полученной информации в рамках существующего понимания задач диагностики машин и механизмов. Подходы к диагностике насосного оборудования соответствуют данным стандартам, но не обеспечивают решение задачи оценки текущего технического состояния.

Для обнаружения дефектов предлагается выявление причинно-следственных связей, вызвавших неисправности. Для обработки информации и принятия решений, в том числе для диагностики насосного оборудования, применяются в основном статистические методы, спектральный анализ, теория надежности, нечетких множеств, нечеткой логики, случайных процессов и др. Например, для определения межремонтных интервалов применяется теория надежности на базе статистики отказов при эксплуатации оборудования и аналогичных машин. Данный подход ведет к необоснованному сокращению межремонтных интервалов и отсутствию надежной аварийной защиты. Большое значение уделяется видам анализа, сопровождаемым экспертной оценкой. В стандартах указывается, что статистическое определение вероят-

ности отказа не гарантирует получение достоверной информации о зарождающихся дефектах и надежной аварийной защиты.

Для оценки надежности и межремонтных интервалов требуется регистрация суммарных значений времени эксплуатации, наработки на ресурс, числа отказов, аварий, числа пусков и отключений, суммарного числа ремонтов. Контролируемыми параметрами являются давление перекачиваемой жидкости, потребляемая мощность привода, температура подшипников, температура корпуса привод и насоса, различные утечки, вибрации НА, давление и температура масла в системе смазки, давление воды в системе охлаждения. Техническое обслуживание включает сбор и подготовку информации для получения базовых характеристик, также создание базы результатов вибродиагностики по допустимому уровню вибрации и по скорости изменения вибрации относительно базовой характеристики и т.д. для получения предварительной информации при выходе НА в ремонт с приложением перечня возможных дефектов. В соответствии с нормативными документами метод диагностирования заключается в сравнении фактических характеристик с базовыми по результатам статистической обработки за установленные интервалы времени (2100...3000 ч).

Отсутствует однозначный универсальный подход к определению неисправностей НА, поэтому анализируется множество факторов, влияющих на его вибрационное состояние. Вибродиагностика НА не дает устойчивых повторяющихся результатов, поэтому каждый НА требует индивидуального подхода и собственной вибродиагностической базы данных.

Вибродиагностирование НА проводится путем:

- оценки верхней доверительной границы точечного значения вибрации;
- оценки степени изменения статистических параметров текущей последовательности точечных значений вибрации относительно базовой характеристики;
- оценки диагностических коэффициентов двух последовательностей точечных значений вибрации.

То есть анализируются вибросостояние на соответствие нормативам по каждой контрольной точке установки датчиков, сравниваются уровни вибрации по всей совокупности контролируемых точек НА. Указывается, что при анализе надо учитывать также условия эксплуатации, режимы перекачки нефти, наличие или отсутствие кавитации, влияние погодных условий и др.

Рассмотренные применяемые подходы к диагностике насосного оборудования не обеспечивают требуемого уровня информации о текущем техническом состоянии насосного оборудования, что повлекло необходимость анализа большого объема информации, статистических отказов и технического обслуживания.

Прогноз безаварийной работы в отраслевых документах предлагается строить на базе изменения параметров вибрации с выявлением трендов. Основой

прогноза технического состояния НА является верхняя доверительная граница прогнозируемого значения вибрации и анализ спектра, что недостаточно для диагностики отдельных частей НА.

Вопросы эксплуатации насосного оборудования, связанные с оценкой текущего технического состояния, отражают общую проблему эффективности диагностики циклических машин и механизмов. В настоящее время не удается отказаться от системы регламентных ремонтов и внедрить систему ремонтов в соответствии с текущим техническим состоянием и, следовательно, увеличить межремонтный интервал. Это связано с недостаточной эффективностью традиционно применяемых методов, в том числе вибродиагностики.

*Основные проблемы вибродиагностических систем.*

1. Низкая точность измерения основных параметров (виброскорость и виброускорение), что соответствует относительной погрешности измерений в диапазоне 1...10%, которая не позволяет получать информативные диагностические признаки для оценки текущего технического состояния, определения зарождающихся дефектов и прогноза.

2. Используя измеряемые физические величины (виброскорость и виброускорение), не удается установить надежную взаимосвязь между результатами измерений и конструкцией, получить количественную оценку изменений в устройстве для оценки технического состояния. Поэтому отсутствуют автоматизированные и автоматические системы диагностики.

3. Виброакустический сигнал содержит информацию о взаимодействии деталей работающего механизма, в том числе его естественный вибрационный фон. Высокий уровень помех и сравнительно малые изменения измеряемого сигнала значительно усложняют выявление дефектов. Структура спектров на длительных интервалах эксплуатации радикально изменяется, и поэтому их использование для оценки технического состояния, получения трендов и прогноза не представляется возможным (ГОСТ 30848-2003).

Основное развитие методов вибродиагностики идет в направлении совершенствования математической обработки виброакустической информации, но в связи с перечисленными факторами не удается решить задачу диагностики дефектов и прогноза безаварийной работы.

В связи с изложенными факторами в технической диагностике насосного оборудования преобладают экспертные оценки, качество которых носит субъективный характер, и они зависят от профессионального уровня специалиста, не обеспечивая принятие надежных решений для выполнения управляющих воздействий, выявления зарождающихся дефектов и аварийной защиты.

Низкая эффективность виброакустической информации и отсутствие количественных оценок в характеристике технического состояния машины выражается в рекомендации использовать ранжирование

в виде качественных категорий (ГОСТ 30848-2003), например:

- «вероятность правильного диагноза отказа данного вида незначительна»;
- «низкая вероятность правильного диагноза отказа данного вида»;
- «средняя вероятность правильного диагноза отказа данного вида»;
- «высокая вероятность правильного диагноза отказа данного вида»;
- «диагноз отказа данного вида будет поставлен достоверно».

Нормативные документы рекомендуют также диагностику по рабочим параметрам (например, энергопотребление, производительность, температура, давление, мощность, рабочая скорость и др.), если они могут быть использованы как диагностические признаки, но тогда требуется более высокая точность их измерения. Повышение эффективности параметрической диагностики реализуется за счет увеличения числа контролируемых параметров и повышения потенциала вычислительной техники. Вследствие низкого метрологического уровня и слабой связи рабочих параметров с зарождающимися дефектами надежная диагностика не обеспечивается.

Сейчас, как правило, анализ технического состояния начинается после обнаружения отклонения параметров от штатных значений или на базе опыта оператора. Это характерно для амплитудных методов, к которым относится вибродиагностика, а также и при измерении большого числа параметров, что характерно для параметрического подхода. Оцениваются отклонения в соответствии с принципом Солсбери при сравнении контролируемых параметров с эталонными значениями, установленными на базе опыта, результатов испытаний, отраслевых нормативных документов и большого объема статистики.

Утверждается, что наиболее эффективными являются методики диагностики, которые должны определять разработчики оборудования, но системы мониторинга и диагностики технического состояния объекта, как правило, разрабатывают специализированные организации.

При диагностировании для экспертной оценки и окончательных выводов специалист в соответствии со стандартами должен суммировать информацию, оценивая изменение параметра и глобальные диагностические признаки, отклоненные и подтвержденные неисправности, аналогичные отказы, вероятности и критичности неисправностей. Такой подход является следствием отсутствия необходимого метрологического уровня и надежных диагностических признаков для получения достоверной информации.

В соответствии с ГОСТ 30848-2003 технология диагностирования включает этапы предварительного анализа, включающие определение критичных узлов, «анализ видов отказов и их связь с неисправностями отдельных узлов машины». Это значит, что для про-

ведения диагностики требуется иметь опыт эксплуатации, перечень дефектов и результаты их анализа, но далеко не все дефекты проявляются на начальном этапе эксплуатации. И только после этого осуществляется разработка стратегии и системы мониторинга и диагностики. Такой длительный процесс неприемлем для дорогостоящего оборудования при высоких затратах на техническое обслуживание.

Важным элементом технической диагностики являются диагностические признаки. Для получения информации и оценки технического состояния циклических электромеханических систем необходимы устойчивые диагностические признаки, максимально качественно независимые от влияния условий эксплуатации и изменений режимов работы. Также они должны отражать количественные изменения и обеспечивать взаимосвязь результатов измерений с конкретными узлами оборудования. В настоящее время, как показала многолетняя практика, вибродиагностике не удается в полной мере решить эту задачу.

Таким образом, недостатками традиционных методов диагностики являются:

- отсутствие автоматических и автоматизированных систем оценки текущего технического состояния машин и механизмов,
- преобладание экспертной оценки, зависящей от профессионального уровня специалиста,
- уменьшение длительности межремонтных интервалов,
- наличие непроизводительных затрат технического обслуживания,
- сложность обнаружения зарождающихся дефектов,
- проблемы обеспечения надежной аварийной защиты,
- снижение конкурентоспособности изделий и организаций.

#### **Фазохронометрический метод диагностики циклических машин и механизмов**

Практика и исследования показали, что для решения проблем более эффективно применение фазовых методов по сравнению с амплитудными, так как фазовые методы связаны непосредственно с функционированием механизма и рабочим циклом его частей, а не физическими эффектами, являющимися следствием работы машины (вибрации, удары, температура и др.).

Одной из реализаций фазовых методов в технической диагностике является фазохронометрический метод диагностики циклических машин и механизмов, разработанный в МГТУ им Н. Э. Баумана [1...6]. Фазохронометрический метод на первом этапе был применен к приборам точной механики, для которых традиционные подходы неработоспособны, так как в них практически отсутствуют вибрация, удары, температурный нагрев и т.п. Следующими объектами применения метода были турбоагрегаты, двигате-

ли внутреннего сгорания, газотурбинные двигатели, металлорежущее оборудование, а также редукторы, подшипники и др. Была показана работоспособность и эффективность фазохронометрического метода диагностики для циклических машин и механизмов.

Особенностью фазохронометрического метода является регистрация кинематических параметров движения основных частей циклического устройства, совершающих рабочий цикл. При этом вся совокупность затрат на техническое обслуживание, текущие и капитальные ремонты направлена на обеспечение надежности и работоспособности машины, то есть поддержание ее рабочего цикла в соответствии с заданными заводом-изготовителем параметрами.

Основным контролируемым параметром фазохронометрического метода являются интервалы времени, соответствующие рабочему циклу частей устройства, например, вращению турбины магистрального насоса нефтепровода и вала электропривода. Так как рабочий цикл в заданном режиме функционирования машины обладает относительной стабильностью и повторяемостью кинематических параметров движения частей на всем этапе эксплуатации, появляется возможность выявления устойчивых во времени характеристик (диагностических признаков) позволяющих регистрировать медленно протекающие процессы износа и другие изменения для анализа и оценки технического состояния. Также при необходимости выполняются измерения рабочих параметров.

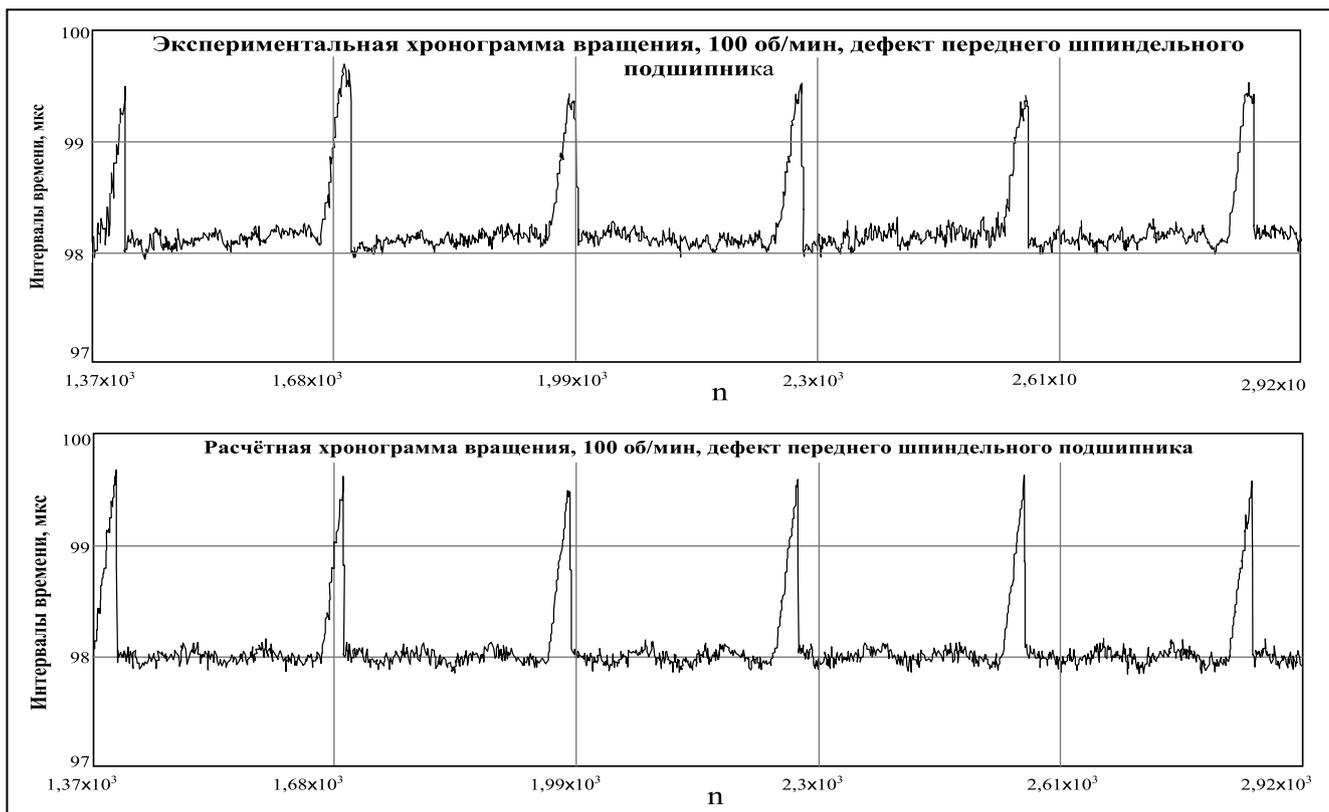
В связи с тем, что интервалы времени измеряются с точностью, недостижимой для других физических величин, фазохронометрические измерения вариаций интервалов времени обладают большой чувствительностью к влиянию различных факторов на процесс функционирования устройства, например:

- погрешности изготовления деталей и узлов;
- влияние износа (например, износ подшипников качения);
- регистрация возникающих зарождающихся дефектов на более ранней стадии, так как уровень помех для фазохронометрических измерений значительно ниже (при виброакустических измерениях присутствует естественный фон вибрации машины),
- влияние условий эксплуатации;
- влияние изменений рабочих режимов эксплуатации;
- наличия кавитации и др.

*Основные преимущества фазохронометрического метода диагностики*

1. Практически достигнутая высокая точность измерения интервалов времени в условиях эксплуатации машин до  $1 \pm 10^{-7}$  с. обеспечивает регистрацию изменений в работе устройства, связанных с взаимодействием конструктивных элементов, процессов и условий эксплуатации.

2. Высокий метрологический уровень (относительная погрешность  $5 \cdot 10^{-4}\%$  на промышленной частоте 50 Гц) позволяет получить индивидуальные



Экспериментальная и расчетная хронограммы вращения шпинделя токарного станка при наличии дефекта переднего подшипника

количественные характеристики для устойчивых фазохронометрических диагностических признаков зарождающихся дефектов. Достигнутый метрологический уровень дает возможность получить более высокую детальность информации по сравнению с вибродиагностикой.

3. Наиболее существенным преимуществом метода является использование математических моделей на базе научной теории, описывающей работу конкретного типа циклических механических и электро-механических изделий для интерпретации и связи результатов измерений с частями устройства для оценки работы машины и выявления диагностических признаков дефектов. Результатом математического моделирования являются ряды интервалов времени, соответствующие экспериментальным данным (интервалам времени), получаемые фазохронометрическими системами. Математическая модель отрабатывается на примерах хорошо известных режимов работы изделия. Это дает возможность перенести на этап испытаний начало разработки стратегии мониторинга технического состояния оборудования и наработку диагностических признаков с дальнейшим уточнением алгоритмов выявления дефектов на этапе эксплуатации. Возможности ЭВМ позволяют использовать математические модели и алгоритмы на их основе для обработки результатов измерений и выявления диагностических признаков дефектов.

Пример применения математической модели для обеспечения взаимосвязи экспериментальных данных (интервалы времени оборота и его долей вращения шпинделя станка в системе привод-редуктор-подшипники-шпидель) и результатов вычислительного эксперимента показан на рисунке. Представлен дефект переднего подшипника токарного станка.

Таким образом, фазохронометрический метод позволяет выполнить анализ работы устройства, моделирование дефектов и наработку классификации дефектов, начиная со стадии испытаний объекта, что минимизирует затраты на разработку мониторинга, диагностики и аварийной защиты машин и механизмов.

4. Диагностические признаки, получаемые на базе фазохронометрических измерений, значительно более устойчивы к различным воздействиям, так как

*Единственный путь к достижению  
прочной устойчивости жизни –  
непрестанное движение вперед.*  
Генри Уэллис

взаимосвязаны с устойчивостью рабочего цикла, то есть инвариантны к воздействиям и создают предпосылки для создания автоматизированных и автоматических систем диагностики.

Таким образом, фазохронометрический метод позволяет перевести диагностику машин и механизмов на новый уровень и решить задачу создания автоматизированных и автоматических систем оценки текущего технического состояния. Фазохронометрический метод является отечественной разработкой и позволяет решать задачи импортозамещения и повышения конкурентоспособности отечественной продукции, в том числе насосного оборудования для трубопроводного транспорта.

#### Список литературы

1. *Пронякин В.И.* Фазохронометрия в обеспечении информационно-метрологического сопровождения жизненного цикла машин и механизмов // Мир измерений. 2011. №9. С. 57-61.
2. *Пронякин В.И.* К вопросу оценки результатов измерений и их обработки в целях получения информации о функционировании машин и механизмов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. №5. С. 74-83.
3. *Потапов К.Г., Сырицкий А.Б.* Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков // Приборы. №5, 2014. С.18-22.
4. *Кошкин А.С.* Математическое моделирование измерительно-вычислительного контроля электромеханических параметров турбоагрегатов фазохронометрическим методом // Измерительная техника. 2013. №8. С. 12-15.
5. *Бережко И.А., Гостюхин О.С., Кошкин А.С.* Информационные измерительные фазохронометрические системы для диагностики в области электроэнергетики // Приборы. 2014. №5. С. 13-17.
6. *Киселев М.И., Кошкин А.С., Байков А.И., Пронякин В.И., Руденко А.Л.* Многофакторное информационно-метрологическое сопровождение эксплуатации гидроагрегатов на базе фазохронометрического метода // Гидротехническое строительство. 2015. №2. С.2-8.

*Пронякин Владимир Ильич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Метрология и взаимозаменяемость», директор научно-образовательного–инжинирингового центра «Прецизионное метрологическое обеспечение машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
Кудрявцев Евгений Александрович – технический директор НОЦ ИЦ «ПМОМ» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
Лось Людмила Алексеевна – старший преподаватель кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Контактный телефон 8 (499) 267-09-94.  
E-mail: vip-u@yandex.ru*

**Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:**

через каталоги "Роспечать" **81874** и "Пресса России" **39206** • сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакцию

**Адрес редакции:** 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (495) 334-91-30, (926)212-60-97 E-mail: info@avtprom.ru