



ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО КОСВЕННЫМ ДАННЫМ

В. М. НАГОРНЫЙ, А. А. ЧЕРЕВКО

Рассмотрено два примера оценки технического состояния роторных машин: в первом рассмотрена возможность использования сигнала, получаемого с датчика, находящегося в штатной системе контроля компрессора, а во втором в качестве диагностической информации использовались данные вибрации стенки водогонной трубы, вызванные потоком протекающей по ней жидкости.

Two examples of evaluation of the technical condition of rotary machines are presented. In the first example the possibility of using the signal from a transducer located in the compressor standard monitoring system is considered, and in the second case data on vibration of the water supply pipe wall, created by the running liquid flow, were used as diagnostic information.

Виброакустическая диагностика (вибродиагностика), которую еще называют безразборной дефектацией, определяет техническое состояние машины по косвенным параметрам, к которым относятся чаще всего параметры паразитных вибраций, неминуемо сопровождающих работу машины.

Однако понятие вибродиагностика следует понимать не буквально, а как наименование научного направления технической диагностики, для которого источником информации о состоянии машины является собирательное понятие — вибропараметр. Под этим термином следует понимать волновые процессы, содержащие информацию обо всех колебательных и периодических процессах, возникающих при функционировании машины. Эта информация может содержать сведения об относительных и абсолютных смещениях узлов и деталей, о пульсации скоростей и давлений в рабочих средах, о полях силовых воздействий, акустической эмиссии в узлах трения и т. п. В связи с этим частотный диапазон виброакустических параметров простирается от долей герца до сотен килогерц.

Практически все виды дефектов изменяют характеристики вибропараметров, что делает их незаменимыми при использовании в целях диагностирования.

До сих пор большое внимание уделялось определению и анализу параметров механических колебаний. Для этого разработан широкий спектр датчиков, регистрирующей и анализирующей аппаратуры.

Немаловажна также достаточная простота преобразования вибрационного сигнала в электрический и возможность дальнейшей его обработки и логического анализа с помощью современной микропроцессорной техники.

Однако введение виброконтроля приводит к увеличению себестоимости производимой продукции за счет включения в нее стоимости диагностической аппаратуры, дополнительной для штатной системы контроля, что не выгодно производителю. Это выгодно заказчику, так как диагностическая аппаратура за время эксплуатации

машины себя неоднократно окупит. Однако он, как правило, в момент покупки не желает платить за новую и поэтому исправную машину большую цену, полагая, что она будет исправной всегда.

Поэтому имеется компромиссный путь — использовать в качестве диагностической информацию, поступающую от штатной системы контроля за состоянием машины.

В данной статье приводятся два примера использования в диагностических целях подобной косвенной информации.

В качестве первого примера рассмотрим возможность использования сигнала, получаемого с датчика давления, находящегося в штатной системе контроля компрессора. Предметом виброобследования был компрессор, в системе управления которого применяется датчик давления.

Экспериментальная часть исследований заключалась в определении уровня виброскорости A в мм/с на основных узлах компрессорного агрегата, а также запись сигнала с датчика давления. Виброизмерения осуществлялись с помощью прибора «Вибропорт» с одновременной регистрацией измеряемых сигналов на магнитофон. Сигнал с датчика давления регистрировался непосредственно на магнитофон. Измерения проводили в рабочем режиме компрессора.

Обработку зарегистрированных сигналов проводили на компьютере (рис. 1) с помощью специально разработанной для этого программы. В результате этой обработки определялся частотный состав (спектр) вибрации компрессора в точках

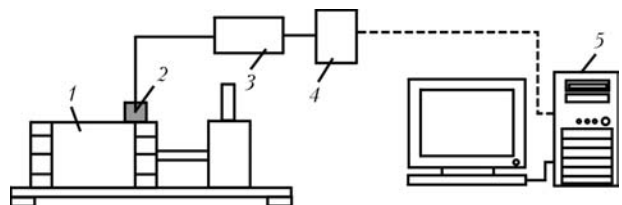


Рис. 1. Схема регистрации и дальнейшей обработки вибросигнала: 1 — диагностируемая установка; 2 — датчик; 3 — вибропорт; 4 — магнитофон; 5 — ЭВМ

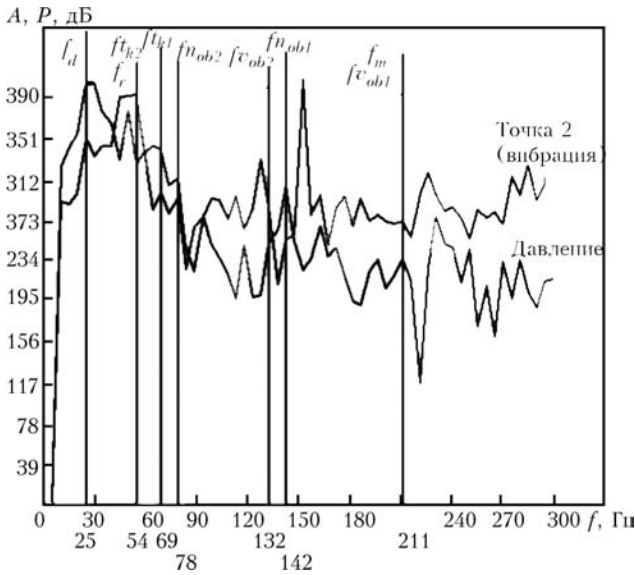


Рис. 2. Сравнение спектров давления и вибрации компрессора в точке 2

контроля и спектр сигнала, зарегистрированного по датчику давления.

Далее спектры вибраций сравнивались со спектром давления с целью определения информативности последнего, т. е. наличия в спектре давления тех же информативных гармоник, что и в спектре вибраций.

Пример подобного сравнения приведен на рис. 2 и 3. Спектры вибрации и давления представлены в логарифмическом масштабе в децибелах, что существенно повышает информативность анализируемых данных. На рис. 2 спектры ограничены 300 Гц, а на рис. 3 — 2000 Гц. Сравнение показывает, что информативность спектра давления и вибросигнала одинакова. Вертикальными линиями на графиках отмечены информационные гармоники, проявляющиеся в равной степени как в традиционном для вибродиагностики источнике информации — спектре вибрации, так и в источнике косвенной информации — спектре давления. На указанных рисунках использованы следующие условные обозначения: f_d — оборотная гармоника, реагирующая на появление и развития дисбаланса ротора; f_r — вторая оборотная гармоника, реагирующая на появление и развитие расцентровки роторов привода и компрессора; ft_{k1} , ft_{k2} — гармоники, реагирующие на дефект тел качения соответственно переднего и заднего подшипников привода; fn_{ob1} , fn_{ob2} — гармоники, реагирующие на дефект наружной обоймы соответственно переднего и заднего подшипников привода; fc_{ob1} , fc_{ob2} — гармоники, реагирующие на дефект внутренней обоймы соответственно переднего и заднего подшипников привода; f_m — гармоники, реагирующие на дефект муфты, соединяющей привод с компрессором.

Информативность спектра давления наглядно демонстрирует спектр на рис. 3, свидетельствующий о том, что спектр давления не менее широкополосен, чем спектр вибраций. В обоих спектрах в равной степени четко проявляется гармоника

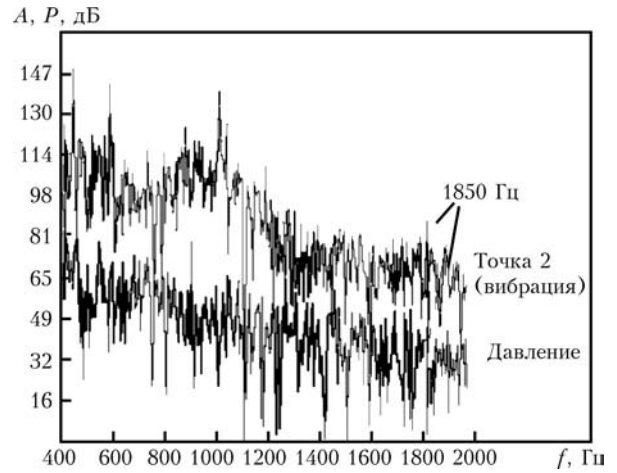


Рис. 3. Сравнение спектров давления и вибрации компрессора в точке 2 в полосе частот до 2000 Гц

на частоте 1850 Гц, генерируемая шестернями мультипликатора. На рис. 4 приведен только спектр давления в естественных единицах давления (атмосфера избыточная — ати), где также достаточно наглядно проявляются все указанные выше информативные гармоники.

Таким образом, сравнение спектров вибрации и давления показывает, что информация, получаемая со штатных датчиков давления, вполне приемлема для диагностики технического состояния компрессора. Этот вывод относится и к другим по конструкции компрессорам.

В качестве второго примера рассмотрим оценку технического состояния погружного оборудования артезианской скважины, проведенную по косвенным данным — вибрации стенки водогонной трубы, вызванной потоком протекающей по ней жидкости.

Оборудование артезианской скважины, основу которого составляют центробежный электронасос ЭЦВ14-210-300Х, в рассматриваемом случае находилось на глубине 260 м (рис. 5) и было недоступно для непосредственного инструментального контроля. Оценка его состояния традиционно

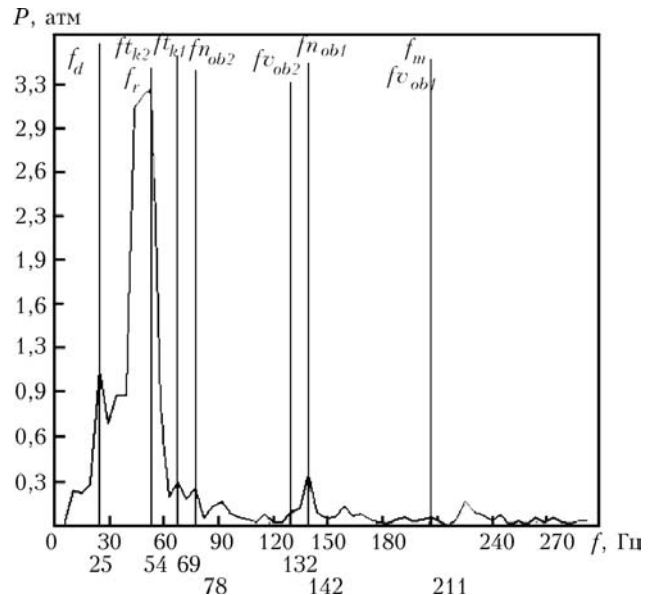


Рис. 4. Спектр давления «рабочего тела», создаваемого компрессором

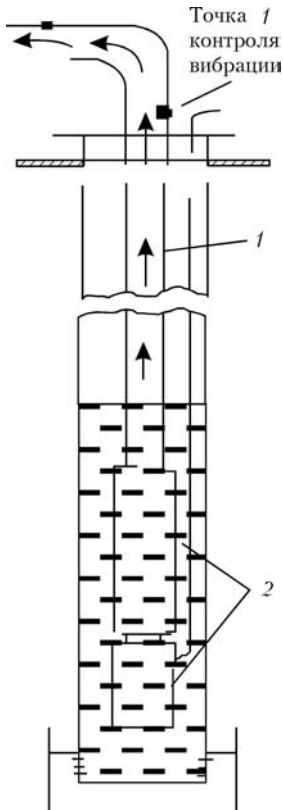


Рис. 5. Схема артезианской скважины с указанием точки контроля вибрации стенки водогонной трубы: 1 — погружной электронасос; 2 — водогонная труба

из скважины (рис. 5).

Анализ спектра показал, что он содержит гармонические составляющие, соответствующие кинематической схеме агрегата, т. е. содержит гармоники на частотах, совпадающих с оборотной частотой ($f_{ob} = 50$ Гц); второй оборотной частотой ($F_{ras} = 2 \times f_{ob}$); подшипниковой частотой насоса ($F_{pnas} = f_{ob} \times 8$); подшипниковой частотой двигателя ($F_{dv} = f_{ob} \times 12$); частотой роликовой муфты ($F_m =$

проводится на основе анализа интегральных данных — давлению, расходу перекачиваемой жидкости и силе тока, подаваемого на привод.

Методика измерения вибраций и дальнейшая обработка информации аналогична рассмотренной выше с тем отличием, что измерения проводились не однократно, а еженедельно в течение 9-ти месяцев. Регулярность измерений позволяла оценивать после каждого из них текущее состояние оборудования и прогнозировать его наработку до выхода из строя (отказа).

Исходными для диагностирования данными являлись спектры вибраций стенки водогонной трубы (рис. 6), получаемые по результатам анализа косвенных для погружного оборудования, находящегося на глубине 260 м, измерений вибраций стенки водогонной трубы в месте выхода ее

$= f_{ob} \times 12$); лопаточной частотой насоса ($F_{kol} = f_{ob} \times 7$); лопаточной частотой двигателя ($F_{kdv} = f_{ob} \times 8$).

Алгоритм диагностирования построен на анализе особенностей изменения во времени уровня информационных гармоник. При этом временной тренд уровня информационной гармоник рассматривается как сумма двух трендов, первый из которых обусловлен развитием усталостной трещины, а второй износом трущихся пар. Первый тренд описывается аналитической зависимостью, отражающей физику развития трещины, а второй — физику износа. Ресурс оборудования является параметром этих зависимостей.

Пример подобного суммарного тренда и его составляющих трендов для лопаточной гармоники, реагирующей на дефект рабочего колеса насоса, приведен на рис. 7.

Для данных, приведенных на рис. 7, вклад износа в состояние колеса составлял 75 %, а развитие трещины — 25 %.

Алгоритм диагностирования построен по индуктивному принципу — от частного к общему. Диагностирование начинается с оценки степени развития дефектов, далее ставится локальный (точечный) диагноз в точке контроля (в отличие от рассматриваемого примера их может быть несколько), а затем ставится диагноз оборудования в целом. Этот диагноз излагается в кратком резюме протокола, а локальные диагнозы и оценка степени развития дефектов излагается в приложениях к резюме.

Оценка степени развития подконтрольных дефектов осуществляется путем расчета величины классифицирующей функции (называемой разными авторами дискриминантной, решающей и т. п.). Аргументами функции являются безразмерные параметры, описывающие степень изменения и скорость изменения уровня информационной гармоник, соответствующей данному дефекту. Эти параметры приведены к безразмерному виду. Фактическое значение классифицирующей функции сравнивается с ее эталонными значениями и в за-

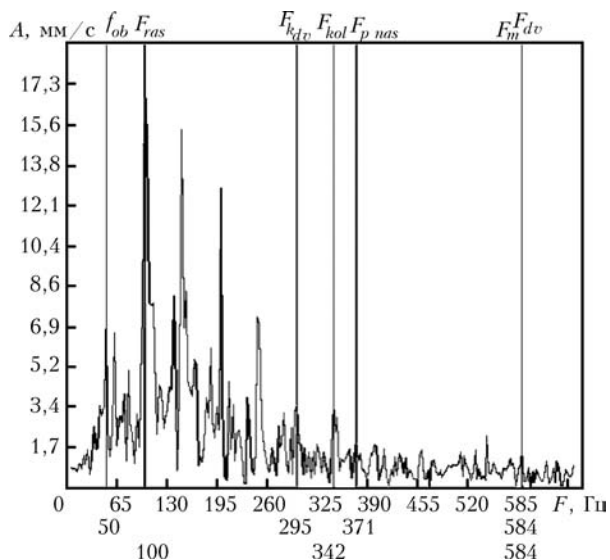


Рис. 6. Типичный спектр вибрации стенки водогонной трубы

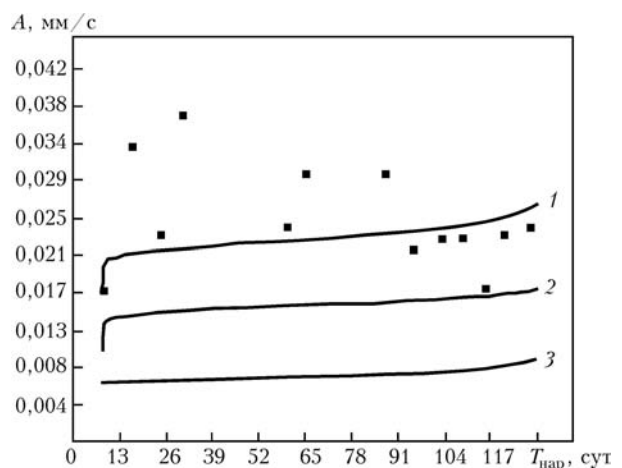


Рис. 7. Изменение за время эксплуатации скважинного оборудования лопаточной гармоники, реагирующей на дефект рабочего колеса насоса: 1 — A_{sum} ; 2 — A_{vib} ; 3 — A_{tr} ($T_{нар}$ — время наработки)



висимости от того, в какой эталонный интервал попадает фактическое значение функции, выдается одно из следующих сообщений: дефект отсутствует; степень развития дефекта ниже средней; степень развития дефекта средняя; степень развития дефекта выше средней; степень развития дефекта недопустимая.

Эти сообщения дополняются указанием наработки до оптимальной остановки на ремонт и до предельной степени развития дефекта; о доле, приходящейся в развитии дефекта на прочность (развитие трещины в силовых элементах) и на износ пар трения и характеристикой скорости развития дефекта.

Далее, по величине суммарного уровня вибрации, приведенного к безразмерному виду, и максимальному значению классифицирующей функции, характеризующей дефект, имеющий наибольшую степень развития, ставят локальный диагноз в точке контроля: узел в точке контроля исправен; узел в точке контроля работоспособен; узел в точке контроля требует осмотра; узел в точке контроля требует ремонта.

Затем на основании локального наихудшего диагноза ставится диагноз узлу в целом: узел исправен; узел работоспособен; узел требует осмотра; узел требует ремонта.

И, наконец, на основании наихудшего диагноза отдельных узлов, ставится диагноз оборудованию в целом: оборудование исправно; оборудование работоспособно; оборудование требует осмотра; оборудование требует ремонта.

Во всех случаях диагноз сопровождается указанием наработки до оптимальной остановки на ремонт и наработки до отказа, причины отказа и ремонта соответственно.

Пример протокола диагностирования скважинного оборудования полученного по данному алгоритму приведен ниже:

ПРОТОКОЛ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АГРЕГАТА

№ 15 от 19.07.04 г.

Агрегат подлежит ремонту

по причине неудовлетворительного состояния узла агрегата, где установлен датчик /;

наработка агрегата до остановки на ремонт составляет 0...7,3 сут;

наработка агрегата до его отказа составляет 4,86...7,71 сут.

Более полная информация записывается в Приложении к протоколу «Характеристика дефектов узла машины, где установлен датчик 1 на 19.07.04 г. (В данной статье подробно не приводится. Заинтересованных просим обращаться к автору.)

Сумск. гос. ун-т

ДИАГНОЗ УЗЛА МАШИНЫ В ТОЧКЕ УСТАНОВКИ ДАТЧИКА на 19.07.04 г.

Узел машины подлежит ремонту.

Причина: Износ подшипников двигателя наработка узла машины до остановки на ремонт составляет: 0...7,3 сут;

наработка узла машины до его отказа из-за развития дефекта составляет: 4,86...7,71 сут.

Терминология протокола рассчитана на использование нескольких точек контроля, а не одной, как это было сделано при косвенной оценке состояния скважинного оборудования.

При постановке диагноза принята достаточно жесткая концепция «слабого звена», в результате этого диагноз на более высоком иерархическом уровне ставится на основании наихудшего диагноза, полученного на более низком уровне. Это оправдано для оборудования опасных производств (АЭС, химические предприятия и т. п.). Для городского коммунального хозяйства и т. п. можно использовать менее жесткие правила, когда диагноз на более высоком уровне ставится на основании усредненного по тем или иным правилам диагноза, полученного на предыдущем более низком иерархическом уровне.

В рассмотренном примере приведенный в протоколе диагноз полностью подтвердился. Скважинное оборудование отработало до отказа спрогнозированный в соответствии с рассмотренным алгоритмом диагностирования срок. Причина отказа, которая внешне проявилась через заклинивание ротора двигателя, также была указана в протоколе.

Выводы

Рассмотренные выше примеры свидетельствуют о возможности использования косвенных данных при диагностировании оборудования. Также следует отметить, что диагноз состояния промышленного оборудования, поставленный на основе прямых или косвенных данных, следует согласовывать с информацией, получаемой с помощью штатной системы контроля, т. е. с данными о температуре, давлении, режиме работы оборудования и т. д.. Изменение этих параметров вызывает изменение характера функционирования машины, а их игнорирование может приводить к ошибочному диагнозу.

1. Нагорный В. М., Черевко А. А. Оценка фактического технического состояния скважинного оборудования // Вестник СумДУ. — 2005. — № 1 (73). — С. 109–112.
2. Вибрации энергетических машин / Справ. пособие. Под ред. Н. В. Григорьева. — Л.: Машиностроение, 1974. — 464 с.
3. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. — М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.

Поступила в редакцию
27.07.2005