

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИКИ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ ДЛЯ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЧРЕЗМЕРНЫХ РАДИАЛЬНЫХ НАГРУЗОК НА ПОДШИПНИКАХ

Е.Н. Новиков, В.В. Савоськин, Д. Доан, К. Шрайнер,
Д. Ганди, Б. Хархес (General Electric Company)

Показано, что использование алгоритмов определения технического состояния механического оборудования, заложенных в диагностическое программное обеспечение (ПО) System 1, совместно с интеллектуальной платформой предиктивной аналитики Smart Signal, предназначенной для поддержки принятия решений, повышает эффективность работы инженеров по вращающемуся оборудованию и надежность основных активов предприятия.

Ключевые слова: техническое состояние динамического оборудования, вибромониторинг, предиктивная аналитика, поддержка принятия решений.

Введение

Техническая диагностика является составной частью технического обслуживания. Основной задачей технического диагностирования является обеспечение безопасности, функциональной надежности и эффективности работы технического объекта, а также сокращение затрат на его техническое обслуживание и уменьшение потерь от простоев в результате отказов и преждевременных выводов в ремонт. Общей задачей технической диагностики является адекватное распознавание истинного состояния объекта и классификация этого состояния (нормального или аномального). В процессе диагностики для определения возникшей проблемы используются различные методы, базирующиеся на анализе большого объема информации, поступающей от различных систем. Зачастую бывает сложно проводить оперативный анализ этих данных силами специалистов по неразрушающему контролю (вибродиагностики, дефектоскописты и т. д.). На помощь приходят различные методы моделирования состояния объектов, которые автоматически обнаруживают отклонения в работе оборудования на ранней стадии и позволяют провести предиктивную аналитику и диагностику состояния до возникновения серьезных проблем [1, 2].

Интеграция программных продуктов System 1 и SmartSignal

Цель интеграции программных продуктов System 1 (вибродиагностика динамического оборудования) и SmartSignal (предиктивная аналитика) заключается в возможности раннего обнаружения изменений в поведении оборудования и повышении качества диагностики этих изменений (прежде всего, в ответственном и критичном оборудовании).

ПО System 1 представляет собой запатентованную программную платформу GE, предназначенную для контроля за эксплуатацией динамического оборудования, мониторинга его состояния и диагностики возникающих событий в реальном времени. System 1 также может быть применима к определенным процессам, которые обычно не входят в зону ответственности АСУТП, таким как управление расходом топлива, оптимизация горения и др.

Функциональные возможности платформы System 1:

- уведомление об изменении состояния динамического оборудования;
- экспресс анализ первопричин появления изменений на основе механических данных оборудования и параметров технологических процессов (ТП);
- глубокий анализ возникших изменений в ТП с помощью встроенных инструментов диагностики;
- формирование отчетов и рекомендаций о корректирующих действиях в отношении возникших изменений;
- рекомендации по внесению изменений в программу технического обслуживания и ТП.

Программный комплекс SmartSignal представляет собой программно-алгоритмическую основу для построения систем мониторинга состояния оборудования и раннего обнаружения нештатных ситуаций. Основной целью системы SmartSignal является отслеживание состояния оборудования на основе измеренных параметров процесса в режиме реального времени. Система представляет собой источник информации об эталонном функционировании оборудования в различных состояниях (режимы функционирования, изменяющиеся внешние условия, изменение состояния оборудования — старение, притирка, обкатка, износ и т. п.). SmartSignal в режиме реального времени осуществляет сравнительный анализ текущих измеренных значений параметров оборудования с расчетным эталонным состоянием. По результатам анализа выполняется автоматическое оповещение пользователей о соответствии/несоответствии текущего состояния оборудования штатному режиму функционирования. В случае несоответствия штатному режиму осуществляется классификация неисправности с указанием проблемного узла/подсистемы.

Для тестирования предложенного решения было выбрано критически важное турбомашинное оборудование с подшипниками скольжения, так как такие типы агрегатов наиболее сильно влияют на показатели производительности и экономической эффективности предприятия. При этом имеются возможности оперативно изменять режимы работы этих агрегатов.

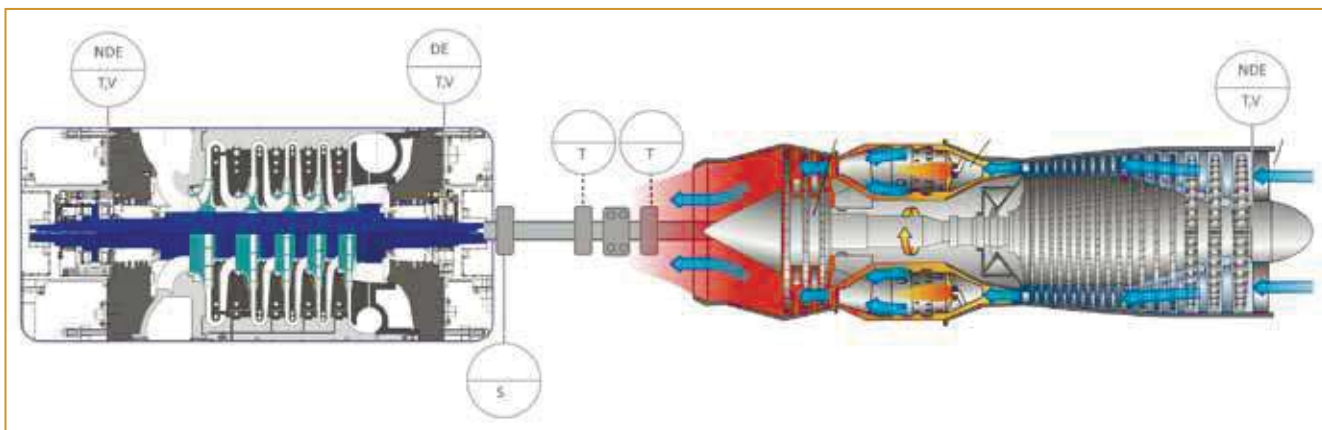


Рис. 1. Компрессор, соединенный с приводной газовой турбиной (частота вращения 6800... 9500 об/мин)

Первым объектом тестирования интеграционного решения стал центробежный компрессор газа, расположенный на нефтедобывающей платформе (рис. 1)¹. Поток газа регулируется посредством сочетания клапанов регулирования скорости и технологических дроссельных клапанов. Пакет SmartSignal, используя инструменты математического моделирования и набор специальных правил (диагностик) для идентификации неисправностей, исследует изменения в состоянии подшипников. Далее, ПО System 1 выполняет анализ статических и динамических параметров вибрации и данных о ТП с использованием наборов правил для подтверждения изменений, выявленных SmartSignal.

Проведенное тестирование позволило на раннем этапе обнаружить повышенную предварительную нагрузку на подшипники² и диагностировать «возможную расцентровку» газовой турбины и центробежного компрессора.

Моделирование нормального режима работы компрессора

При моделировании нормального режима работы компрессора в системе SmartSignal использовались следующие показатели, вычисляемые на базе динамических и статических параметров оборудования и данных о ТП из ПО System 1:

- развернутая фаза: непрерывный расчет фаз, включающий скачок при переходе между 0 и 360 гр., отрицательно влияющий на моделирование;
- $1x^3$ амплитуда и фаза с компенсацией: векторная разница между $1x$ вектором вибрации при медленном вращении ротора и $1x$ вектором вибрации на номинальной частоте вращения ротора, которые получены от датчиков вертикального и горизонтального относительного перемещения ротора;

- большая (самая длинная) и малая (самая короткая) ось измеренной $1x$ орбиты движения центра вала;
 - прямой и обратный вычисленные $1x$ векторы: получены путем комбинирования $1x$ векторов от вертикального и горизонтального датчиков виброперемещения;
 - прецессия орбиты: направление прямой прецессии совпадает с направлением вращения вала; обратная прецессия соответствует противоположному направлению;
 - форма орбиты: числовая величина, описывающая круговую, эллиптическую, сильно вытянутую эллиптическую, плоскую и неопределенную форму;
 - эллиптичность: вычисленная величина в диапазоне 0...1, описывающая меру эллиптичности формы орбиты (0 означает форму идеального круга, 1 — прямую линию). Большинство орбит умеренно эллиптические, поэтому эта величина обычно находится между 0 и 1;
 - степень синхронности (High Synchronous Ratio): вычисленная величина, характеризующая отношение максимальной $1x$ амплитуды, значение которой получено от датчика вертикального или горизонтального смещения, к максимальной допустимой величине $1x$ амплитуды;
 - температура металла подшипника: основное и вспомогательное (если имеется) значения температуры баббита подшипника для подтверждения наличия предварительного натяга в пределах зазора подшипника.
- На основе анализа приведенных основных показателей были разработаны пять специальных диагностических рекомендаций по раннему предупреждению повышенной предварительной нагрузки на подшипники, охватывающих наиболее распространенные проблемы, связанные с механическими дефектами оборудования:

¹ Системы уплотнений и управления компрессором опционально включены в решение SmartSignal для предиктивной аналитики.

² Предварительная нагрузка подшипника представляет собой однонаправленную силу, действующую на ротор в пределах зазора подшипника или уплотнения. Она может включать уже существующие силы, возникшие в результате расцентровки, после проведения монтажа подшипников или уплотнений и центровки оборудования. Однако этот термин также применяется и в режиме нормальной эксплуатации к состояниям по радиальным нагрузкам подшипников, которые существуют в любой момент времени (несмотря на то, что эти состояния могут значительно отличаться от фактического предварительного натяга, существовавшего первоначально).

³ $1x$ — представляет собой вибрационный параметр (амплитуда, фаза, орбита) на частоте, соответствующей частоте вращения.



Рис. 2. Динамические расчеты для ротора в SmartSignal

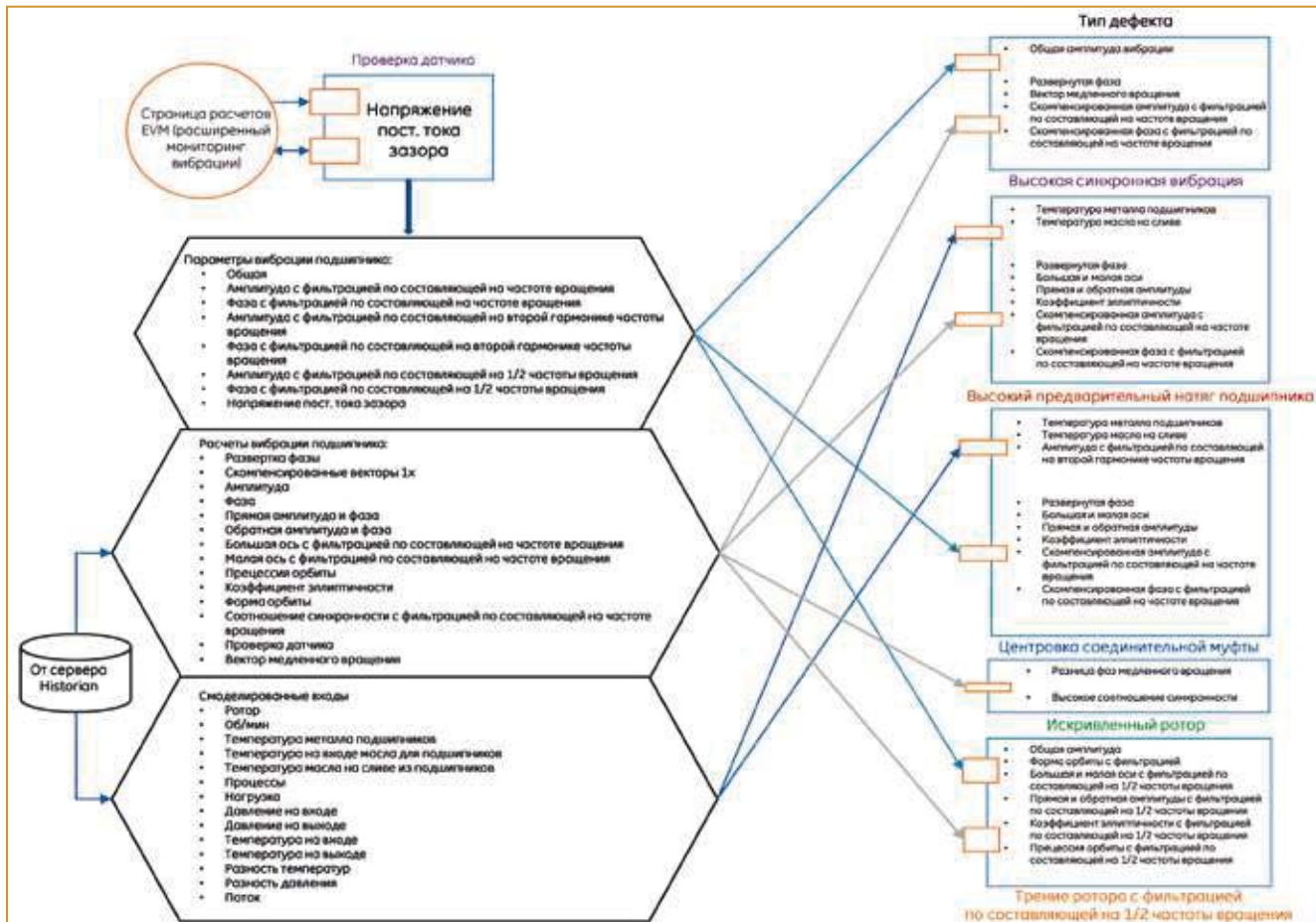


Рис. 3. Расчетные значения из ПО SmartSignal (ввод данных страницы расчетов EVM в левом верхнем углу) объединяются с данными технологического процесса (из Historian в левом нижнем углу) для формирования пяти диагностических рекомендаций (справа)

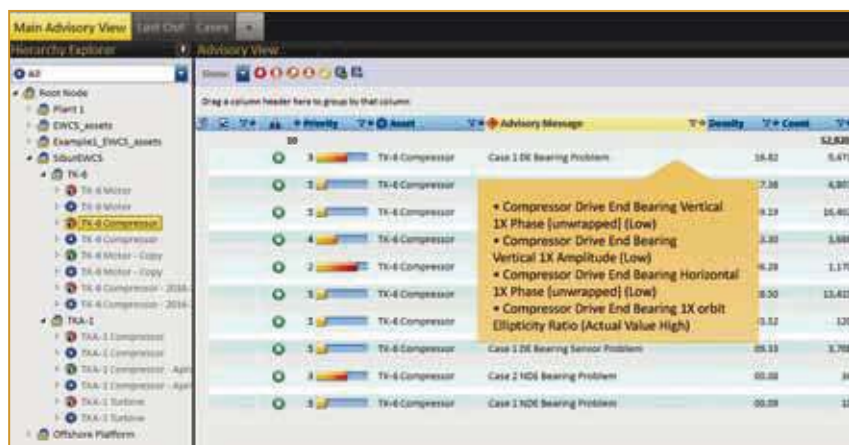


Рис. 4. Экран с рекомендациями ПО SmartSignal Santinel

радиальная предварительная нагрузка, высокая синхронная вибрация (с фильтрацией по составляющей на частоте вращения), расцентровка и вероятная расцентровка, изгиб ротора, несинхронное задевание.

Затем проводилось подтверждение адекватности моделей с помощью расчетов в среде SmartSignal.

Исторические значения параметров вибрации из System 1 являются исходными данными для расширенного мониторинга вибрации в ПО SmartSignal (рис. 2). Здесь параметры разделяются на разные эксплуатационные режимы и используются для создания модели работы агрегата. Значения параметров из смоделированной системы сравниваются с фактическими текущими значениями, измеренными на агрегате. Полученные при сравнении различия используются в качестве исходных данных для аналитических функций диагностики.

На рис. 3 показано, какие результаты моделирования соответствуют какой диагностической реко-

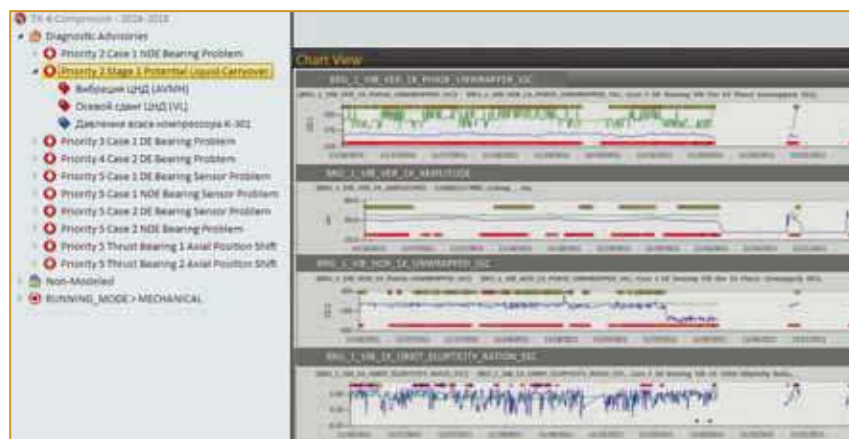


Рис. 5. Графики трендов для параметров, по которым была сформирована рекомендация относительно высокой радиальной предварительной нагрузки на подшипник компрессора. На этих графиках показаны (сверху вниз): основной тег (мощность и частота вращения, используемые для определения рабочего состояния компрессора), вертикальное смещение — 1х фаза, вертикальное смещение — 1х амплитуда, горизонтальное смещение — 1х фаза, коэффициент эллиптичности 1х орбиты с фильтрацией по составляющей на частоте вращения

⁴ Bently Nevada 3500 – система промышленного мониторинга и защиты, на аппаратном уровне подключаемая к агрегату непосредственно на производственной площадке.

мендации, генерируемой системой SmartSignal. В дальнейшем диагностические рекомендации используются для глубокого понимания состояния агрегата при диагностике.

Описание проекта

Первичный показатель высокой радиальной предварительной нагрузки опорного подшипника скольжения формируется на базе двух факторов:

- повышенное значение коэффициента эллиптичности орбиты 1х;
- высокие значения температуры металла подшипника.

Эти параметры используются при моделировании поведения исследуемого объекта в ПО SmartSignal. Кроме данных о вибрации, полученных из System 1, при построении математической модели используется широкий спектр показаний КИП агрегата: частота вращения, перепад давления между ступенями, температура окружающей среды; зависимые параметры подшипников (давление, температура и расход смазочного масла, осевое смещение); а также расчетные параметры: КПД, мощность на валу, степень сжатия и т. д.

Решение SmartSignal позволяет учитывать при моделировании не только нормальные статические параметры оборудования (давление, температуру, частоту вращения и т. д.), но и статические параметры, получаемые из системы Bently Nevada 3500⁴ или ПО System 1 (амплитуда и фаза вибрации с фильтрацией по составляющей на частоте вращения, амплитуда и фаза с фильтрацией по составляющей на второй гармонике частоты вращения и т. д.). Таким образом, в единой модели комплексно используется информация из различных источников. Предложенный подход позволяет обнаруживать деградацию узлов оборудования на раннем этапе. Например, SmartSignal позволяет рассчитать допустимую предварительную нагрузку на подшипник с целью обнаружения изменений предварительного натяга после останова, простоя или аварии.

Математический аппарат, заложенный в SmartSignal, использует для обучения исторические данные о параметрах работы оборудования в нормальном режиме. Для этого отбираются данные о работе агрегата при стабильных режимах (исключая переходные режимы, остановки, пуски, а также эксплуатация на аварийных режимах).

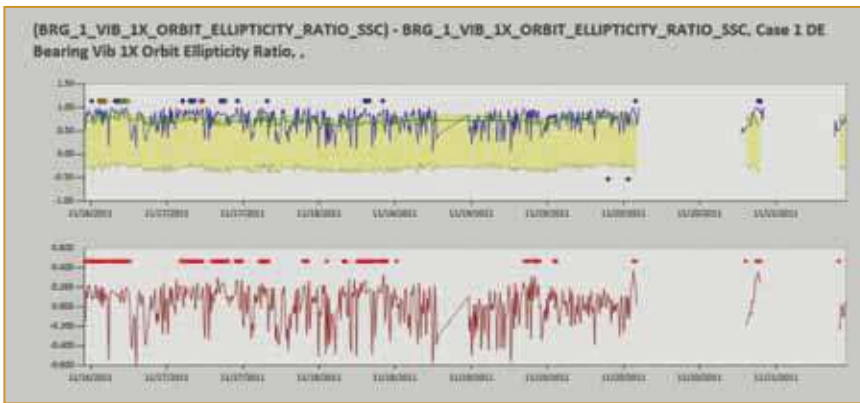


Рис. 6. Графики иллюстрируют, что фактическое значение эллиптичности вибрации на подшипнике газового компрессора со стороны привода превышает пороговое значение, рассчитанное с помощью модели

Series Type	Tag Alias	X Value	Y Value
Actual	BRG_1_VIB_1X_ORBIT_ELLIPTICITY_RATIO_SSC	11/16/2011	0.91
Estimate	BRG_1_VIB_1X_ORBIT_ELLIPTICITY_RATIO_SSC	11/16/2011	0.74

Рис. 7. Значения коэффициента эллиптичности для подшипника компрессора со стороны привода (BRG_1)

Результаты проекта

Установка, исследованная в целях данного проекта, прошла проверку тракта горячего газа турбины и полную проверку газового компрессора. При последующем пуске предварительная нагрузка на подшипник компрессора со стороны привода увеличилась, при этом коэффициент эллиптичности резко увеличился с $\sim 0,3$ до $\sim 0,8$.

На рис. 4 показан экран системы мониторинга состояния и отображения диагностических рекомендаций SmartSignal Sentinel для высокого уровня радиальной предварительной нагрузки подшипника компрессора и список сопутствующих тегов для одной из диагностических рекомендаций. В данном случае в рекомендацию включены следующие параметры:

- подшипник компрессора со стороны привода, вертикальное направление, 1x фаза [развернутая] (низкое);
- подшипник компрессора со стороны привода, вертикальное направление, 1x амплитуда (низкое);
- подшипник компрессора со стороны привода, горизонтальное направление, 1x фаза [развернутая] (низкое);
- подшипник компрессора со стороны привода, коэффициент эллиптичности, 1x орбиты (высокое фактическое значение).

При двойном щелчке кнопкой мыши на отображаемой рекомендации на экране SmartSignal Sentinel Advisory выводятся сопутствующие параметры, на основании которых были сгенерированы данные рекомен-

дации (рис. 5). На этом экране все параметры, входящие в состав диагностического шаблона, перечислены в виде иерархии вместе со всеми параметрами ротора, используемыми в модели. Помимо ротора могут быть одновременно проанализированы любые другие группы активов или единиц оборудования.

На рис. 5 показаны диаграммы, включенные в диагностическую рекомендацию «Приоритет 4. Высокая радиальная предварительная нагрузка на подшипник на не приводной стороне по Варианту 1». Первичными показателями высокой радиальной предварительной нагрузки на подшипник являются: вертикальная 1x амплитуда и развернутая 1x фаза, горизонтальная развернутая 1x фаза и коэффициент эллиптичности 1x орбиты. Шаблоны, разработанные группами специалистов GE по решениям Bently Nevada и SmartSignal, включают алгоритм, необходимый для выявления вероятных причин «Высокой радиальной предварительной нагрузки» подшипника со стороны привода.

При радиальной нагрузке выше нормы срок службы подшипника может уменьшиться, например, при работе оборудования может нарушиться целостность слоя гидродинамической пленки подшипника, что приведет к нагреву металла подшипника и в конечном итоге выходу его из строя.

Одним из первичных показателей высокой предварительной нагрузки подшипника является коэффициент эллиптичности. Коэффициент эллиптичности представляет собой частное от деления разности между 1x амплитудами по большой и малой осями орбиты вибрации на 1x амплитуду по большой оси. Его значение может находиться в диапазоне от нуля (правильный круг) до единицы (прямая линия). Эта величина дает представление о форме орбиты для моделирования и формирования диагностических рекомендаций.

Коэффициент эллиптичности является одним из исходных параметров для рекомендаций относительно высокой предварительной радиальной нагрузки и расцентровки. На рис. 5 и 6 коэффициент эллиптичности отклоняется от расчетного порогового значения приблизительно на 0,17. Для данного подшипника коэффициент эллиптичности, как правило, составляет приблизительно 0,74. Его фактическое значение составляет 0,91 (рис. 7). Соответственно отклонение от круговой орбиты увеличилось на 0,17, что указывает на повышенную предварительную радиальную нагрузку для участка, обозначенного метками на рис. 6.

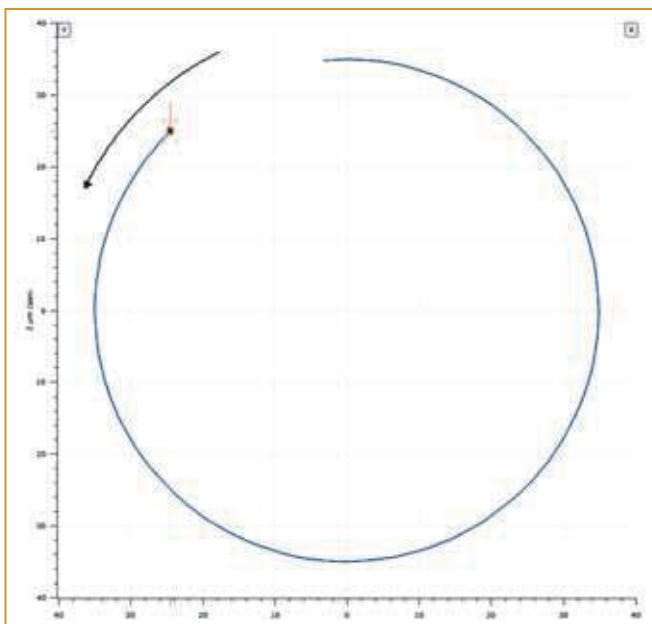


Рис. 8. Подшипник со стороны привода газового компрессора: 1x орбита, полученная с помощью ПО System 1, имеет малый коэффициент эллиптичности, что свидетельствует об отсутствии чрезмерной радиальной нагрузки

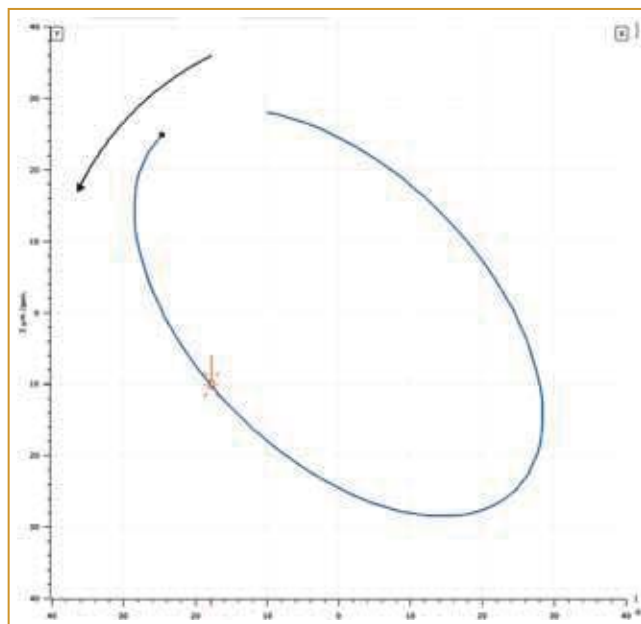


Рис. 9. 1x орбита, показывающая изменение эллиптичности орбиты, свидетельствует об изменении радиального преднатяга подшипника

Этот прогноз, то есть понимание того, что радиальная предварительная нагрузка увеличилась и превысила нормальные значения по результатам моделирования, позволяет инициировать дополнительный анализ динамических данных в реальном времени с помощью аналитических инструментов системы Bently Nevada компании GE, например ПО System 1, чтобы провести глубокий анализ и понять детали происходящего.

Аналитические возможности ПО System 1

Данные из ПО System 1 используются для выявления последствий воздействия предварительной нагрузки на ротор агрегата. Анализ, выполняемый в System 1, помогает определить, требуется ли капитальный ремонт или немедленные действия не требуются, так как воздействие радиальной нагрузки на ротор достаточно мало.

Представленные на рис. 6 изменения наблюдаемого параметра совпадают с режимом работы ротора, вычисленным в ПО SmartSignal.

Для определения данного режима как нормального необходим большой объем ранее зарегистрированных данных, чтобы «нормализовать» данные и опре-

делить, представляют ли они собой фактическое изменение режима. В связи с этим использовалась OEM документация для компрессора данного класса. Дополнительная информация о вибрационных параметрах и сигналах тревоги из документации позволила системе сделать вывод, что этот режим является нормальным для рассматриваемого компрессора.

Отображенная на рис. 8 1x орбита, зарегистрированная перед предыдущим остановом, имеет правильную круговую форму, что свидетельствует

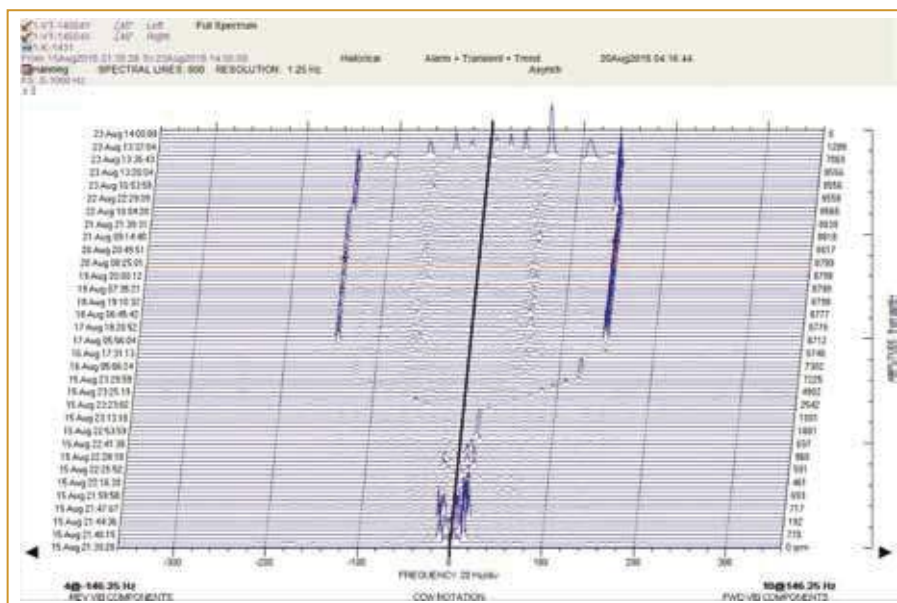


Рис. 10. Данные спектра для прямого и обратного направлений, полученные в ПО System 1. Эти данные свидетельствуют об отсутствии очевидного повреждения опорного подшипника скольжения компрессора

об отсутствии чрезмерной радиальной нагрузки. Такая орбита с формой правильного круга несколько необычна, однако амплитуда имеет малую величину, и это свидетельствует о том, что подшипник находится в исправном состоянии [2].

После полной проверки компрессора наблюдалось изменение радиальной предварительной нагрузки на подшипник (рис. 9). Это свидетельствует о том, что во время останова произошло некоторое событие, которое привело к изменению нагрузки на подшипник. Как правило, это может происходить в результате проведения центровки оборудования или регулировки подшипников во время работ по техническому обслуживанию. Наблюдаемые уровни вибрации и симптомы повышенной радиальной предварительной нагрузки являются признаком изменения предварительной нагрузки и говорят о необходимости исследования этого изменения во время следующей остановки агрегата. Однако уровни предварительной нагрузки и вибрации были довольно малы и не требовали прерывания работы оборудования до следующего планового капитального ремонта.

На рис. 10 показан каскадный график полного спектра данных, сбор которых длился примерно 3 мес. (с 19 ноября по 12 февраля). «Полный» спектр означает, что параметры вибрации измеряются как для прямого, так и обратного направлений прецессии. Наблюдаемая вибрация вала ротора была нормальной, поэтому принято решение вести мониторинг подшипников вала на предмет ухудшения параметров, а также ввести дополнительную проверку в процедуру центровки подшипников во время следующего планового технического обслуживания подшипников ротора.

Заключение

Рассмотренный практический пример демонстрирует широкие возможности системы предиктивной аналитики SmartSignal.

НОВЫЕ КНИГИ

Виктор Владимирович Савоськин – инженер подразделения GE – Bently Nevada (неразрушающий контроль), **Дон Доан** – главный инженер неразрушающего контроля, **Крис Шрайнер** – ведущий инженер-испытатель, **Деванг Ганди** – ведущий инженер исследовательского отдела, **Бакер Хагхес** – General Electric Company. Контактный телефон (495) 937-11-11.

Раннее обнаружение увеличения радиальной предварительной нагрузки (задолго до проведения полной проверки компрессора) стало возможным благодаря динамическим расчетам параметров ротора в ПО SmartSignal. После обнаружения отклонений от нормального режима работы ротора в ПО SmartSignal проводятся аналитические расчеты в System 1, в которых используются только изменившиеся данные. При этом аналитические возможности System 1 используются для определения причины и последствий соответствующего изменения, а не для первичного поиска изменений в большом массиве данных.

В рассматриваемом примере применены встроенные средства обнаружения аномалий и настроенные правила определения вероятных причин неисправностей из пакета SmartSignal (модифицированного посредством дополнительных значений параметров вибрации, получаемых от системы System 1) в отношении компрессора газа нефтяной платформы. Данное решение позволило успешно осуществить раннее обнаружение и диагностику высокой предварительной нагрузки подшипника и возможной несоосности газовой турбины и компрессора.

На сегодняшний день уже получены аналогичные положительные результаты от совместной работы рассмотренных программных продуктов по мониторингу других активов. К таким активам относятся насосы и электродвигатели с дополнительными разрабатываемыми компонентами, чтобы адаптировать их для самоустанавливающихся сегментных подшипников, подшипников качения, редукторов и другого оборудования.

Список литературы

1. Doan Don. SmartSignal is Now Part of GE – What Does it Mean for You? // Orbit. 2011. Vol. 31. No. 2.
2. Jordan Mark A. What are Orbit plots, anyway? // Orbit. 1993. Vol. 14. No. 4.

НОВЫЕ КНИГИ

Э.П. Ицкович. Особенности современных АСУТП. Издательство ИГУ РАН. 2017 г. 522 стр.

В книге рассматриваются задачи перспективной автоматизации производственных объектов предприятий технологических отраслей.

Анализируются современные технические и программные средства автоматизации производственных объектов: полевого уровня (датчики и исполнительные комплексы); промышленного уровня (контроллеры); информационного уровня (SCADA-программы); а также типовые цифровые сети, соединяющие компоненты систем автоматизации.

Выделяются варианты ПТК и распределенных систем управления (PCU). Приводятся рациональные методы построения и особенности функционирования АСУТП: создание концепции и планирование работ по автоматизации технологических агрегатов; разработка технических требований на создание АСУТП и организация тендера на выбор

исполнителей; организация работ по проектированию, внедрению и эксплуатации АСУТП. Описываются направления развития средств и систем автоматизации и перспективные алгоритмы автоматического контроля, учета и управления работой технологического агрегата.

Рассматриваются важные для эффективного функционирования АСУТП: способы взаимодействия систем автоматизации с операторами технологических агрегатов; мероприятия по рационализации функционирования персонала, управляющего производственными объектами и обслуживающего их системы автоматизации; методы защиты средств и систем автоматизации от воздействий внешней среды и кибератак; необходимые решения по преодолению типичных недостатков построения, внедрения и функционирования АСУТП на российских предприятиях.

<http://mescenter.ru/book>