

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН ПОВЫШЕННОЙ ВИБРАЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

А.Е. Соловьев, Е.С. Рызиков, В.В. Савоськин (Bently Nevada)

Представлен подход компании Bently Nevada к проведению диагностики и мониторинга критического оборудования, проиллюстрированный на конкретном производственном примере. Кратко рассмотрены основные технические решения Bently Nevada в области мониторинга и защиты агрегатов, включая премьеру 2019 г. - платформу Orbit 60.

Ключевые слова: мониторинг, диагностика, критическое оборудование, вибрация, центробежный компрессор.

Методологический подход Bently Nevada к диагностике критического оборудования

Целью диагностического сервиса Bently Nevada является определение неисправностей оборудования в наиболее раннее время, с предоставлением технически и экономически сбалансированных рекомендаций по инспекциям, ремонту и дальнейшей работе. Применяется два типа измерений — прямые и косвенные. К прямым относятся измерения физического состояния компонентов агрегата, они включают амплитуду как общего уровня вибрации, так и отдельных векторных компонент (например, 1X и 2X), радиальное и осевое положение ротора, температуру подшипников, скорость вращения и пр. К косвенным измерениям относятся параметры работы агрегата как части системы; к ним относятся измерение мощности, температуры рабочих жидкостей, давления, расходов, эффективности установки. Для формирования полной картины неисправностей важно находить взаимосвязи данных прямых и косвенных измерений. Измеряемые вибрационные данные подразделяются на статические, то есть мгновенные численные значения переменных, например, вектор и его параметры (амплитуда и абсолютная фаза — направление вектора), значение напряжения зазора, частота и пр., и динамические — форма волны и производные от нее графики (орбита, полный спектр, каскадный график).

Для измерения вибрации вала используются бесконтактные токовихревые датчики, — такое измерение

напрямую отражает реакцию системы на изменение силы/жесткости. Дополнительно могут быть использованы датчики абсолютной вибрации, устанавливаемые на корпус агрегата. Для получения синхронных данных, то есть данных, соотнесенных со скоростью вращения, необходим датчик Keyphasor® (один референсный сигнал фазы за оборот) для каждого валопровода с отличающейся скоростью вращения (изменение скорости при наличии редуктора/мультипликатора).

Вибрация определяется как реакция системы, которая имеет определенную динамическую жесткость, на силу от внешнего и/или внутреннего воздействия. Многие дефекты имеют схожие симптомы, для точного определения дефектов необходимо собрать максимальный объем доступных данных на полной скорости под нагрузкой и без, на старте агрегата и при его остановке.

Производственный пример

Рассмотрим пример решения конкретной производственной проблемы, в котором используется диагностический подход Bently Nevada, агрегат оснащен всеми необходимыми датчиками и измерительными системами в совокупности с системами сбора и хранения данных.

История проблемы

Центробежный компрессор, используемый в производственной линии карбамида, представляет собой безрезервное оборудование, от нормальной работы которого

зависит выпуск продукции. Агрегат состоит из паровой турбины, корпуса компрессора низкого давления, мультипликатора и корпусов среднего и высокого давления с номинальными скоростями вращения для тихоходного ряда ~ 9300 об/мин, для быстроходного ряда ~ 13500 об/мин. На агрегате проведена модернизация с заменой роторов низкого, среднего и высокого давления, а также замена подшипников на новые.

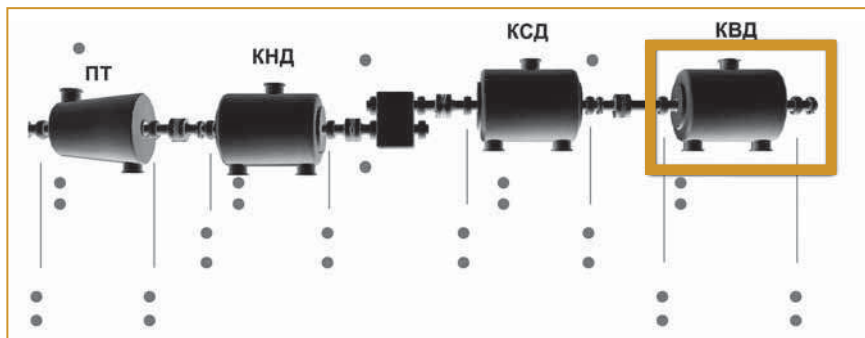


Рис. 1. Схема агрегата с обозначением корпусов и расположением токовихревых датчиков. Повышенная вибрация наблюдалась с обеих сторон КВД

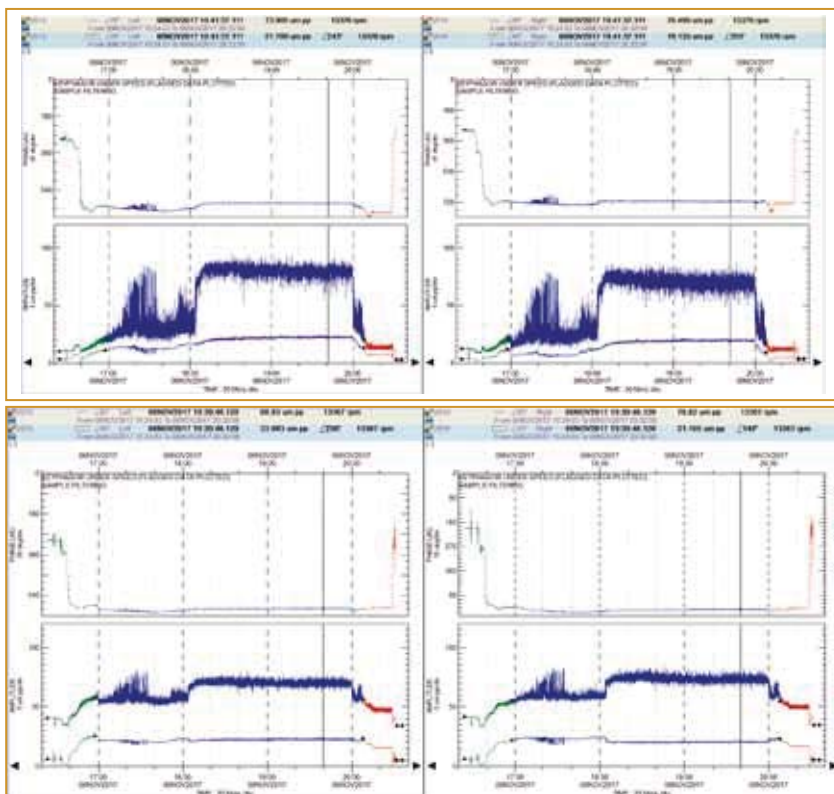


Рис. 2. Тренды относительной вибрации ротора КВД с приводной стороны (верхний график) и не приводной (нижний график). Зеленый цвет – пуск, синий – стационарный режим, красный – останов. Тренд построены на основе статических данных

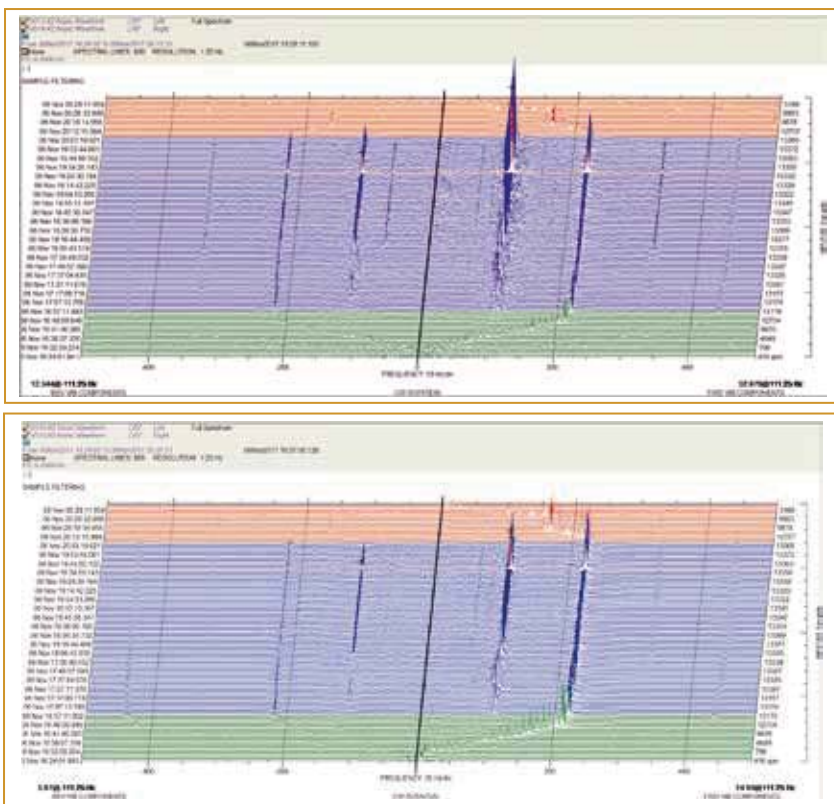


Рис. 3. Водопадные графики полного спектра ротора КВД с приводной стороны – верхний график, с не приводной – нижний. Данные графики – пример динамических данных

Агрегат оснащен токовихревыми датчиками для измерения радиальной и осевой вибрации и положения, датчиками Keyphasor® для сбора синхронных вибрационных данных, являющихся критическими для проведения полноценной вибрационной диагностики. Сигналы от датчиков приходят в систему мониторинга и защиты BN 3500 (рис. 1).

После выхода агрегата из ремонта и его пуска в работу на корпусе компрессора высокого давления наблюдались высокие уровни виброперемещения вала, близкие к уставке «Авария». Диагностическая команда Bently Nevada BHGE была приглашена для сопровождения нового пуска, определения причин повышенной вибрации компрессора и предоставления соответствующих рекомендаций о корректирующих действиях.

Для сбора данных о вибрационном состоянии агрегата и проведения анализа был использован переносной диагностический комплекс BN ADRE SXP, предоставляющий возможность сбора синхронных вибрационных данных одновременно с 24 каналов.

Анализ данных

Анализ данных начинается с определения проблемного узла. Наиболее простой и быстрый способ — тренды вибрации. На графиках трендов относительной вибрации ротора КВД видно, что вибрация увеличилась с обеих сторон агрегата на стационарном режиме работы (постоянная скорость вращения вала). На тренде видно, что при увеличении общего уровня вибрации, уровень компоненты 1X остался практически неизменным, что говорит о появлении дополнительных вибрационных компонент (рис. 2).

Для определения частотных компонент использовался водопадный график полного спектра (множество графиков полных спектров в зависимости от времени — каждая горизонтальная линия отражает полный спектр) и график орбиты (траектория движения вала в подшипниках).

На графиках рис. 3 видно, что рост общего уровня относительной вибрации обусловлен появлением субсинхронной компоненты $\sim 0,5X$ с прямой прецессии (траектория движения вала на этой частоте совпадала с направ-

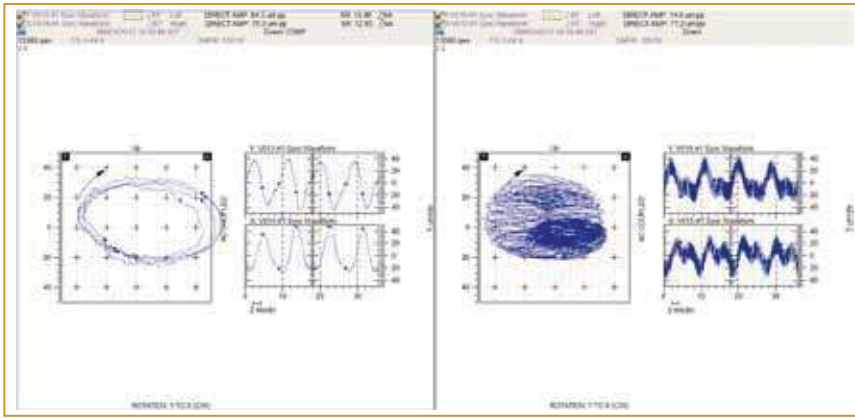


Рис. 4. Скомпенсированные графики орбит ротора КВД при повышенной вибрации с приводной стороны – слева, с не приводной – справа. График орбиты еще один пример динамических данных

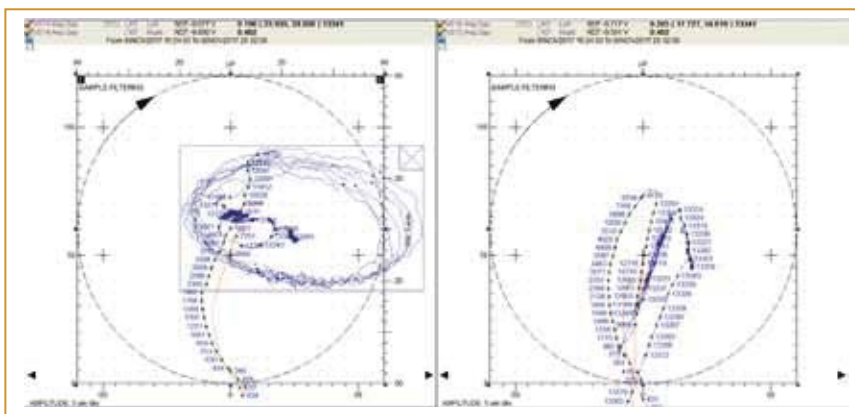


Рис. 5. Положение вала КВД в зазоре подшипников с наложенной орбитой с приводной стороны (слева), с не приводной (справа). Из-за наличия асинхронной помехи с не приводной стороны отсутствует наложение орбиты. Положение вала (статические данные) – значение расстояния вала от датчика в определенные моменты времени

лением вращения вала), характер вибрации похож в обоих подшипниках, при этом больший уровень вибрации наблюдается в подшипнике с приводной стороны. Так как частотное разрешение спектра зависит от ширины измеряемого диапазона и числа линий, для подтверждения информации о кратности субсинхронной компоненты были рассмотрены графики орбит. Очень важно сепарировать точно кратные субсинхронные компоненты (такие как $\frac{1}{4}X$, $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{2}X$) и просто субсинхронные ($0.48X$, $0.51X$), так как небольшая разница в кратности относительно частоты вращения имеет решающее значение в определении дефекта оборудования.

Графики орбит в данном случае (рис. 4) предоставляют следующую важную информацию: субсинхронная компонента имеет частоту ровно $\frac{1}{2}X$, так как точки Keuphasor® (метки на орбите, появляющиеся в момент прохождения проточки на валу под датчиком Keuphasor®) от цикла к циклу не меняют своего положения (две дифференцированные группы точек на левом графике). На правом графике присутствует асинхронная некомпенсируемая помеха, обусловлен-

ная взаимной наводкой токовых датчиков (crosstalk effect), такое явление встречается, например, если при монтаже датчиков не были соблюдены установочные размеры, указанные в паспорте датчика.

Для понимания полной картины динамики вала в подшипниках, помимо вибрации производится измерение положения вала в зазоре, отображаемое на графике центральной линии вала — график представлен в декартовых координатах и отображает множество точек, каждая из которых — это координата центра линии вала в определенный момент времени. Множество точек показывает изменение положения центральной линии вала относительно стенок подшипника (круг на графике). Сочетание информации о вибрации и положении вала позволяет увидеть, где вал находится (положение равновесия под действием предварительных статических нагрузок) и траекторию его перемещения (вибрация от действия динамических сил).

Имеющиеся данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Присутствует повышенная вибрация вала КВД с обеих сторон с более высоким уровнем в подшипнике с приводной стороны.

2. Повышенный уровень вибрации обусловлен присутствием компоненты ровно $\frac{1}{2}X$ с прямой прецессией и значительным уровнем амплитуды.

3. На датчиках с не приводной стороны вала присутствует ВЧ асинхронная помеха из-за взаимной наводки датчиков вибрации.

Анализ собранной информации позволяет говорить о следующих возможных дефектах: задевание, нестабильность рабочей среды, ослабление жесткости опорной системы

Рассмотрим каждый из возможных дефектов подробнее. Задевание может вызывать появление компоненты $\frac{1}{2}X$, если скорость работы ротора превышает модифицированную резонансную частоту в два раза. Резонансная частота модифицируется за счет временного увеличения упругой жесткости системы в момент задевания. На графиках Боде (график показывает изменение амплитуды и фазы вектора вибрации в зависимости от скорости и/или времени — в данном случае вектора $1X$) видно наличие «локального» резонанса в диапазоне скоростей 5900–7300 об/мин (на резонансе фаза изменяется на 90° от первоначального значения), то есть вдвое ниже рабочей скорости вращения, однако по информации произ-

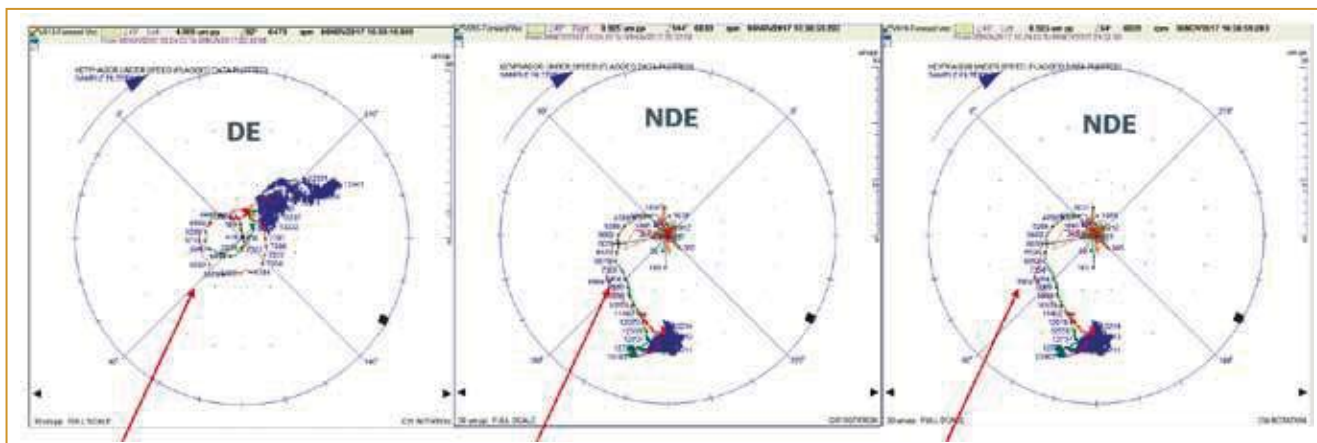


Рис. 6. Скомпенсированные полярные графики ротора КВД, DE – приводная сторона, NDE – не приводная сторона. На графике отображается изменение вектора – статические данные

водителя оборудования, паспортная резонансная частота данного ротора 16900 об/мин, то есть ротор является «жестким» — работает ниже своего резонанса.

Нестабильность рабочей среды обычно не дает точных фракций от рабочей частоты вращения (таких как $\frac{1}{2}X$), однако может создавать близкие к ней частоты, когда срыв потока образуется между лопатками рабочего



Рис. 7. Следы задевания на роторе компрессора

колеса ротора и стационарными лопатками диффузора, например, по причине осевой внутренней расцентровки, когда каналы роторной и статорной части не совпадают между собой.

По информации заказчика все механические параметры опорной системы (зазоры/натяги, прилегания подшипников) находились в пределах допустимых значений.

Так как из имеющихся данных сложно выделить одну причину, диагностической командой Bently Nevada были даны рекомендации, охватывающие все три возможных дефекта, так как экономически целесообразно проверить все возможные неисправности за одну инспекцию. Иначе сохранилась бы вероятность повторного останова и вскрытия.

Было рекомендовано:

1. проверить натяги, зазоры и прилегания в обоих подшипниках КВД;
2. проверить взаимное осевое положение роторных и статорных каналов;
3. проверить ротор компрессора на следы задевания;
4. исправить установку токовихревых датчиков с не приводной стороны для устранения асинхронной помехи.

При инспекции было обнаружено следующее:

1. 2 мм внутренней осевой расцентровки из-за некорректной установки упорного подшипника,

в результате чего поток газа из роторных каналов неправильно заходил в статорные каналы;

2. увеличенный зазор в подшипниках (160 мкм вместо 120 мкм);

3. вместо натяга крышек подшипников в 0,03 мм присутствовал зазор в 0,1 мм.

Таким образом две из возможных причин вибрации (нестабильность и ослабление жесткости опорной си-

стемы) были обнаружено, но дополнительно на торце ротора компрессора были обнаружены следы задевания (рис. 7). Источником задевания был токовихревой датчик, это произошло от неправильного осевого положения ротора, таким образом датчик работал как «дополнительный» упорный подшипник.

Все обнаруженные несоответствия были исправлены (кроме асинхронной наводки с не приводной стороны) и компрессор был запущен в работу с допустимыми значениями вибрации и отсутствием субсинхронной компоненты (рис. 8).

Наиболее вероятной причиной неисправности, согласно теории Bently Nevada, являлось ослабление жесткости опорной системы, так как для формально «жесткого» ротора наблюдался резонанс, но интересно, что на основании проведенного анализа подтвердились все три возможных дефекта.

Выводы

Наиболее сложным в ходе диагностики является анализ совместного проявления нескольких дефектов, когда характеристика вибрационного ответа невыраженная, и точный анализ требует дополнительных исследований. В таких случаях необходимо рекомендовать действия, направленные на уточнение причин неисправности и устранение дефектов. При чем скорейший возврат агрегата в безопасную работу является главным приоритетом.

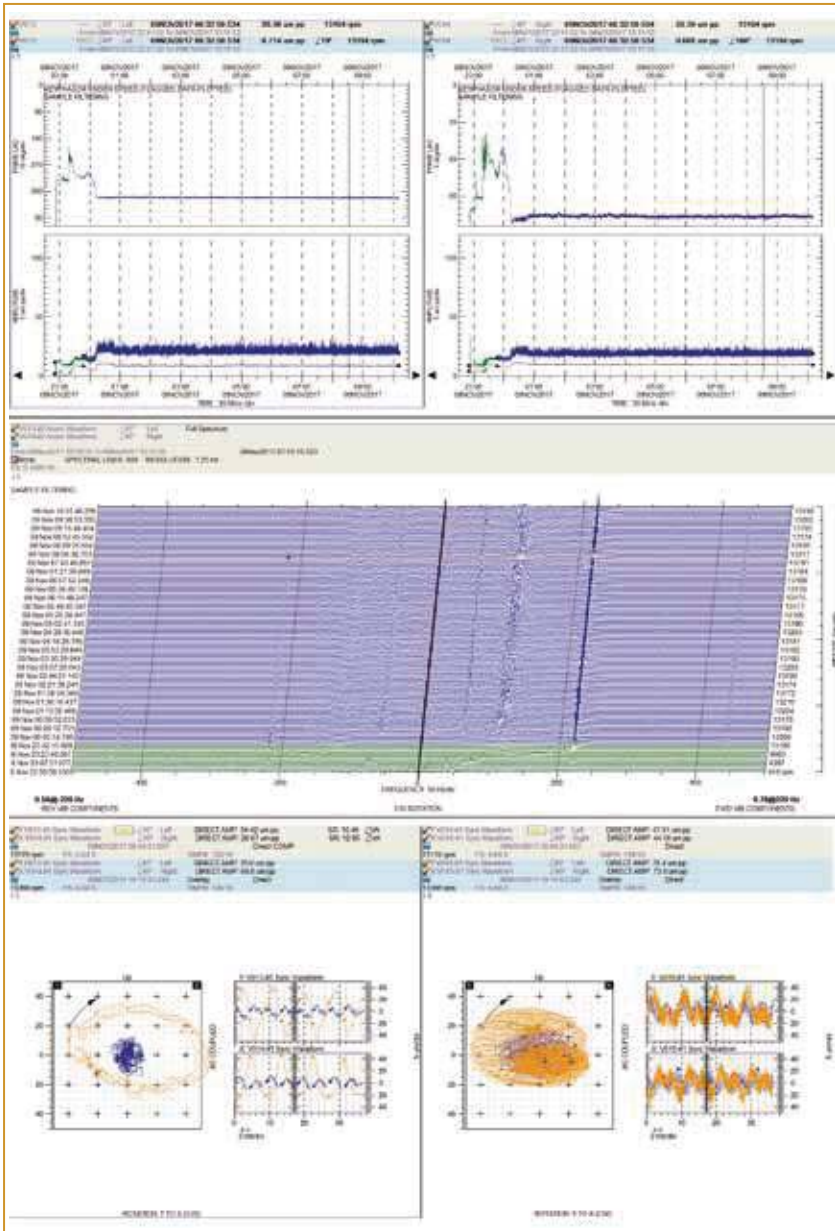


Рис. 8. Данные после диагностики и ремонта. Верхний график – тренд общего уровня и компоненты 1X вибрации ротора КВД, средний график – водопадный график полного спектра, нижний – орбиты вала КВД (синий) с наложением орбит до диагностики и ремонта (оранжевый)

Полученные данные во время работы агрегата и в переходных режимах и знания теоретических особенностей динамики ротора не являются достаточными для определения дефектов конкретного агрегата, к ним необходимо добавить знания особенностей возникновения возможных дефектов и неполадок, а также опыт проведения ремонтных операций. Именно поэтому логотипом диагностической службы Bently Nevada является треугольник, демонстрирующий взаимную важность и связь компонентов (рис. 9).

К особенностям диагностики критических машин следует отнести стоимость простоя агрегата, которая может достигать нескольких миллионов рублей в день, и отсутствие резервных агрегатов, которые могут заменить проблемный на время ремонта

и диагностики. Поэтому главная задача состоит в максимально точном и максимально раннем обнаружении дефектов для успешного планирования ремонтов и минимизации простоя оборудования.

Критические агрегаты требуют постоянной диагностики состояния для определения и оценки дефектов еще на этапе их формирования, с последующей локализацией и планированием ремонтов и инспекций. Именно поэтому агрегаты должны быть оснащены стационарными диагностическими системами с полным набором датчиков. Диагностические системы должны использоваться для постоянного мониторинга, обслуживать их должны квалифицированные специалисты, а система хранения данных должна быть построена таким образом, чтобы можно было произвести оценку и сравнение поведения агрегата на разных пусках и в разных условиях работы.

Краткий обзор технических решений Bently Nevada в области мониторинга и защиты агрегатов

В приведенном примере по диагностике динамического оборудования использовалась стационарная система защиты и мониторинга Bently Nevada 3500 и переносной диагностический комплекс ADRE, который включает аппаратную часть и диагностическое программное обеспечение. Такое техническое решение было обусловлено отсутствием у заказчика установленной диагностической программной платформы System 1. Основными недостатками такого подхода является то, что отсутствует «история» работы агрегата, которая может включать: информацию о состоянии агрегата на переходных режимах, число циклов пусков/остановов и пр. Другой недостаток отсутствия стационарной системы — в случае аварийного останова агрегата для сбора данных портативной системой он должен быть запущен вновь (потенциально может быть очень опасно и может увеличить повреждения машины) или агрегат должен быть проинспектирован без предварительной диагностики (что потенциально добавляет объем работы и увеличивает потенциальные затраты). Таким образом, компания Bently Nevada настоятельно рекомендует оснащать критически важные агрегаты с установленной системой мониторинга и защиты 3500 диагностической программной платформой System 1.

System 1 предназначена для диагностики как критически важного оборудования, так и вспомогательного. В зависимости от критичности оборудования, задач и стратегии по техническому обслуживанию можно выбрать следующие решения от Bently Nevada:

- 3500 — решение для защиты и диагностики критически важных агрегатов в основном с гидродинамическими подшипниками (в том числе поршневых компрессоров, гидроагрегатов, компрессоров);

- ADAPT (3701/40, 3701/44, 3701/55) — on-line системы защиты и диагностики критического оборудования распределенной архитектуры. Данная линейка включает: противоразгонную защиту, решения для турбин на базе авиадвигателей, решения для гидроагрегатов, решения для общего оборудования;

- 2300 — on-line система защиты и диагностики с ограниченным количеством каналов (4) для небольших машин, которым требуется защита;



Рис. 10. Платформа Orbit 60

- VbOnline Pro — система диагностики вспомогательного оборудования с подшипниками качения и зубчатыми передачами, является сканирующей системой;

- Ranger Pro — сканирующее беспроводное решение для диагностики вспомогательного оборудования;

- SCOUT (серия 100, серия 200) — портативные виброизмерительные приборы;



Рис. 9. Основные компоненты мониторинга и диагностики

деленной архитектурой от компании Bently Nevada. Система предназначена для сбора данных с оборудования и предоставления их операторам для аналитики и определения состояния агрегатов.

Отличительные характеристики Orbit 60:

- единая система для on-line-мониторинга для критически важных и для общепромышленных решений;

- кибербезопасность — это первая система мониторинга оборудования с интегрированным решением по кибербезопасности (со встроенным «диодом данных»), с подключением к System 1 для проактивного мониторинга и диагностики. Соответствует ISA 62443;

- расширенная аналитика — возможность обработки сигналов в 100 раз выше, чем в аналогичных системах, что позволяет предоставлять высокоточные данные с агрегатов с большой скоростью.

- масштабируемость — гибкая и масштабируемая архитектура с модульной системой удаленного ввода/вывода и возможностью подключаться к широкому спектру агрегатов от критически важных до вспомогательных, что делает решение идеальной платформой для расширения.

- универсальность — благодаря 80 динамическим каналам, которые могут подключаться ко всем типам агрегатов (по сравнению со средним показателем в отрасли, равным 50) и меньшему физическому размеру, серия Orbit 60 имеет сферы применения от нефтяной и газовой промышленности до энергетики, возобновляемых источников энергии и в других отраслей промышленности.

Соловьев Александр Евгеньевич — ведущий инженер-диагност,

Рызиков Евгений Сердарович — инженер диагност,

Савоськин Виктор Владимирович — инженер по решениям и применению компании Bently Nevada.

Контактный телефон (495) 771-72-45.

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

- по электронному каталогу "Почта России" ФГУП Почта России - подписной индекс **П7753**.
- в **России** — в любом почтовом отделении по каталогу "Газеты. Журналы" агентства "Роспечать" (подписной индекс **81874**) или по каталогу "Пресса России" (подписной индекс **39206**).
- в **России, странах СНГ и дальнего зарубежья** — через редакцию (www.avtprom.ru).

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, начиная с любого номера, прислав заявку в редакцию или оформив анкету на сайте www.avtprom.ru

В редакции также имеются экземпляры журналов за прошлые годы.