

**Организация и функционирование системы
вибрационного контроля, мониторинга, диагностики
сложных механизмов и агрегатов**
*Organisation and functioning of vibration control systems,
monitoring and diagnostics of complex mechanisms and units*

Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н., Костюк С.Ф.
Brancevich P.J., Bazyleu Y.N., Kastsyuk S.F.

Рассмотрена организация и основные функции компьютерной многоканальной системы вибрационного контроля и мониторинга. Подобные системы в режиме реального времени осуществляют мониторинг вибрационного состояния технических объектов, решают задачи сигнализации и защиты. Представлен ряд индивидуальных критериев защиты по вибрационным параметрам. Предложена последовательность действий по обработке длинных реализаций вибрационных сигналов, временных трендов параметров вибрации, принятию решений по оценке технического состояния контролируемого объекта.

An organization and main functions of computer multichannel system of vibration control and monitoring was studied. Such systems in real time carry out monitoring of vibration condition of technical objects, solve tasks on alarm signaling and protection. A number of individual protection criteria according to the vibration parameters is presented. A sequence of actions for processing long realisations of vibration signals, temporary trends of vibration parameters, decision making in the sphere of technical condition of the controlled object is proposed.

Введение

Считается, что на предприятиях энергетики, нефтехимии, машиностроения наиболее изнашиваемым является оборудование с вращательным движением (турбины, генераторы, двигатели, редукторы, насосы, компрессоры, вентиляторы и т.д.). Снизить затраты на его эксплуатацию можно путем внедрения современных систем технического обслуживания, которые базируются на использовании технологий мониторинга параметров технических объектов, оценки состояния, диагностики, прогнозирования развития дефектов. Это позволяет предотвращать аварийные ситуации, вовремя заменять полностью исчерпавшее свой ресурс оборудование, лишь при необходимости проводить его профилактическое обслуживание, ремонт или наладку [1].

При реализации систем оценки состояния технических объектов, на основе результатов работы которых принимаются управляющие решения, важно оценить и соотнести затраты на ее создание и ожидаемые результаты. Также следует учитывать, что эффект от внедрения может быть не очень быстрым.

Состояние производственного оборудования характеризуется многими параметрами основных и вторичных процессов, развивающихся при его работе. Для контроля целесообразно выбирать те параметры процессов, которые достаточно хорошо отражают функциональное состояние объектов и не требуют слишком больших затрат на их измерение. В этом плане, для механизмов с вращательным движением, такими являются параметры вибрации [1, 2].

Вибрационный мониторинг

В зависимости от важности выполняемых оборудованием функций, его стоимости и величины возможного ущерба при внезапной аварии, реализуют периодический или непрерывный стационарный мониторинг параметров вибрации.

При периодическом мониторинге через некоторые промежутки времени (раз в неделю или месяц) с помощью переносных приборов измеряются параметры вибрации подшипниковых опор, а полученные результаты заносятся в специальный журнал или базу данных. Важно, чтобы измерения проводились в сопоставимых условиях при одинаковых или близких режимах работы контролируемого оборудования и частоте вращения ротора. В качестве параметров вибрации чаще всего фиксируют среднее квадратическое значение (СКЗ) в нормированной частотной полосе (для механизмов с частотой вращения ротора более 600 оборотов в минуту это 10–1000 Гц), а также, при наличии возможности, определяются амплитуда оборотной составляющей вибрации (составляющая с частотой, равной частоте вращения ротора), интенсивность низкочастотной вибрации, амплитудный спектр. В результате обработки полученных данных отслеживается выход параметров за нормированные допусковые зоны, строятся тренды изменения параметров вибрации для отдельных механизмов. Далее принимаются решения о проведении расширенных обследований вибрационного состояния подозрительных механизмов, планируются мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту. Периодический мониторинг позволяет отследить динамику изменения технического состояния и дать исходные данные для прогнозных оценок, но не позволяет оперативно отреагировать на внезапные ава-

рийно-опасные ситуации путем отключения оборудования или изменения режимов его работы.

Системы непрерывного стационарного мониторинга внедряют на сложных дорогостоящих агрегатах (турбогенераторах, газоперекачивающих агрегатах и т.п.). Это многоканальная, в современных условиях чаще всего компьютерная, система, определяющая и регистрирующая на каком-то носителе информации значения параметров вибрации через небольшие (не более нескольких секунд) промежутки времени, а также выполняющая допусковый контроль, функции сигнализации и даже защитного отключения [3, 4].

Примером такой системы является измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) серии «Лукомль», разработанный и производимый научно-исследовательской лабораторией систем вибродиагностики БГУИР [5, 6].

Структурно ИВК представляет собой компьютер с подключенным по стандартному компьютерному интерфейсу (PCI, USB) модулем АЦП, блок аналоговой обработки сигналов, на входы которого подаются сигналы с выходов виброизмерительных каналов, и устройство управления сигнализацией и защитным отключением. По сути это перепрограммируемая компьютерная измерительная система, решающая специальные задачи [5–7]. Основными функциями ИВК являются:

- определение в режиме реального времени интенсивности вибрации в стандартизованных или задаваемых частотных диапазонах, частоты вращения вала, значений амплитудных и фазовых параметров до десяти спектральных составляющих вибрации, кратных частоте вращения (порядковый анализ), пик-фактора исходного сигнала;
- сравнение реально полученных значений с контрольными (величина которых может изменяться от точки к точке и с течением времени) и выработка по определенным алгоритмам сигналов сигнализации, выдаваемых на отображающие и исполнительные устройства;
- реализация алгоритмов защиты технических объектов по вибрационным параметрам;
- сохранение результатов обработки контролируемых вибрационных сигналов в файлах.

Комплекс используется в качестве штатной системы вибрационного контроля, мониторинга и защиты турбоагрегатов по вибрационным параметрам на электростанциях Беларуси.

Отличительной особенностью его работы является накопление больших объемов, вычисляемых в ходе вибрационного мониторинга,

параметров, которые записываются в суточные файлы на жестком диске, причем для каждой контролируемой подшипниковой опоры создается свой файл. Периодичность формирования записей по каждой точке контроля – 2–3 секунды. Также сохраняются реализации исходных вибрационных сигналов при возникновении аварийно-идентифицируемых ситуаций. Полученные файлы могут передаваться в производственную АСУ ТП или в хранилища данных (в том числе распределенные и удаленные) для последующей обработки в системах оценки технического состояния и диагностики. Накапливаемые данные представляют собой суточные, месячные, годовые архивы и являются первичными данными для построения систем поддержки принятия решений. Таким образом, реализуется концепция «больших данных» на уровне параметров вибрационного состояния [8, 9].

За время эксплуатации комплекса получен ряд достаточно интересных данных. На рисунке 1 представлен пример развития вибрационной ситуации на турбоагрегате мощностью 250 мегаватт, приведшей к остановке турбоагрегата.

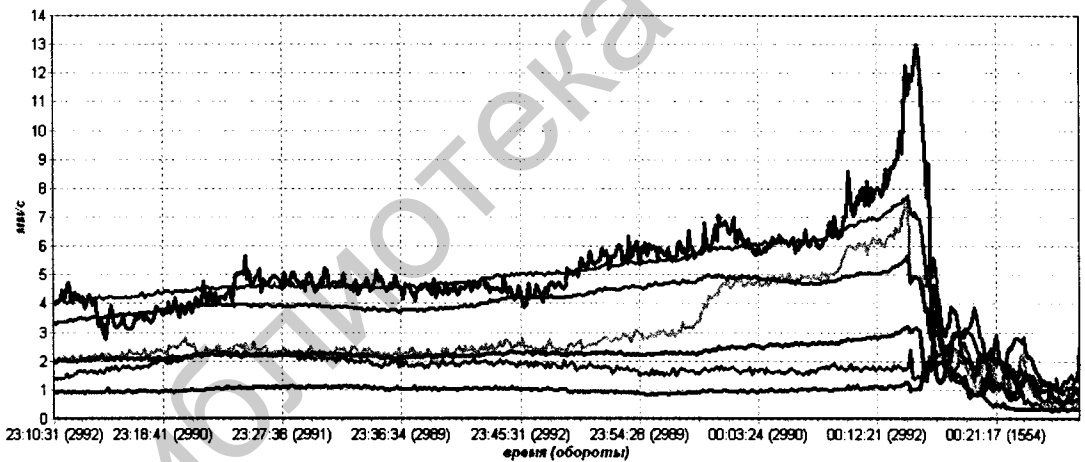


Рис. 1. Изменения СКЗ виброскорости в частотной полосе 10–1000 Гц подшипниковых опор турбоагрегата, потребовавших его остановки

Данная ситуация, характерна тем, что ухудшение вибрационного состояния контролируемого объекта происходило на достаточно длительном (более полутора часов) временном интервале. Технический персонал предпринимал действия режимного плана, направленные на снижение вибрации, которые, к сожалению, не увенчались успехом, и турбоагрегат был остановлен. Последующий анализ показал, что причиной повышения вибрации стало неравномерное смещение сколь-

зующих подшипниковых опор при прогреве. Был зафиксирован еще ряд аварийно-опасных ситуаций, вызванных повышением вибрации, на турбоагрегатах разной мощности [10, 11]. Эти случаи говорят о том, что изменение вибрационного состояния сложных технических объектов при возникновении дефектов даже одинакового типа может быть весьма разнообразным и непредсказуемым, и реализовать системы автоматической защиты таких механизмов, руководствуясь только рекомендациями стандартов [12, 13], весьма проблематично.

Алгоритм защитного отключения

Одной из наиболее важных задач современных систем вибрационного контроля и диагностики является предотвращение аварийного повреждения защищаемого объекта при внезапном возникновении неисправностей или поломок в его узлах или при существенном отклонении каких-либо технологических параметров от номинальных. Однако факт возникновения ситуации, требующей останова технического объекта, во многих случаях имеет неоднозначное отображение в параметры вибрации. Стандартизованные критерии защиты [12, 13] отражают наиболее общие взаимосвязи, полученные на основе длительного опыта эксплуатации и исследования механизмов с вращательным движением, не всегда в полной мере могут удовлетворить эксплуатирующий и управляющий персонал.

Системы вибрационного контроля и защиты, построенные на базе компьютерной техники, позволяют реализовать разнообразные и сложные алгоритмы защиты, ориентированные на конкретные типы дефектов и ситуаций. Это, в свою очередь, позволяет избежать необоснованных («ложная тревога») срабатываний защитного отключения и не допустить «пропуска дефекта».

Реализован и прошел апробацию на ряде турбоагрегатов алгоритм защитного отключения по вибрации, в котором учитывается несколько факторов [10].

1. Фактор низкочастотной составляющей вибрации.

Под низкочастотной вибрацией (НЧВ) понимается среднее квадратическое значение виброскорости в зоне частоты, равной половине оборотной. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если для любой подшипниковой опоры турбоагрегата возникла следующая ситуация: СКЗ виброскорости НЧВ, измеренное для вертикального направления и для поперечно-горизонтального направления любой подшипниковой опоры, на протяжении 4–6 секунд превышает V мм/с и, при этом, хотя бы для одного из этих направлений, оно на протяжении этого же времени превышает $3V$ мм/с. Уровень V определяется типом механизма и его рабочими частотами.

2. Фактор оборотной составляющей вибрации.

Под оборотной составляющей вибрации понимается СКЗ виброскорости спектральной составляющей с частотой, равной частоте вращения вала агрегата.

2.1 Величина СКЗ оборотной составляющей.

Для каждой подшипниковой опоры и каждого из направлений измерения вибрации устанавливается значение СКЗ виброскорости оборотной составляющей, соответствующее аварийному уровню, который выбирается с учетом конструктивных, функциональных и эксплуатационных особенностей контролируемого механизма. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если в четырех или более точках контроля СКЗ виброскорости оборотной составляющей превысило заданный для соответствующей точки аварийный уровень.

2.2. Вектор приращения оборотной составляющей.

Для каждой подшипниковой опоры и каждого из направлений измерения вибрации устанавливается значение вектора приращения оборотной составляющей, соответствующее аварийному уровню. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если в четырех или более точках измерений вектор приращения оборотной составляющей превысил заданный для соответствующей точки измерений аварийный уровень.

3. Фактор высокочастотной составляющей вибрации.

Под высокочастотной составляющей вибрации понимается СКЗ виброскорости в частотной полосе, нижняя граница которой равна двойной оборотной частоте, а верхняя – верхней границе частотного диапазона, в котором производится вибрационный контроль наблюдаемого механизма. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если для любых двух направлений измерения вибрации для любой подшипниковой опоры высокочастотная вибрация превысила значение аварийного уровня, установленного для данного объекта, в течение 3–6 секунд.

Сигнал на защитное отключение контролируемого механизма вырабатывается в том случае, если он выработан по одному из указанных критериев, или по нескольким критериям одновременно.

Обработка вибрационных сигналов и данных вибрационного мониторинга

Исходными данными для вычисления параметров вибрации являются вибрационные сигналы, формируемые первичными виброизмерительными преобразователями, и сигнал от датчика фазовой метки. При этом в настоящее время аппаратно-программные средства

позволяют регистрировать эти сигналы на длительных временных интервалах [14, 15], что создает предпосылки для более качественного решения задач оценки технического состояния и диагностики и внедрения в реальную практику систем обслуживания оборудования по фактическому состоянию.

Для того чтобы определить значения частоты, амплитуды, начальной фазы оборотных составляющих вибросигнала требуется синхронно принимать вибрационный сигнал от первичного виброизмерительного преобразователя и сигнал от датчика фазовой метки (метка должна быть установлена на вращающемся валу). Пример таких сигналов показан на рисунке 2.

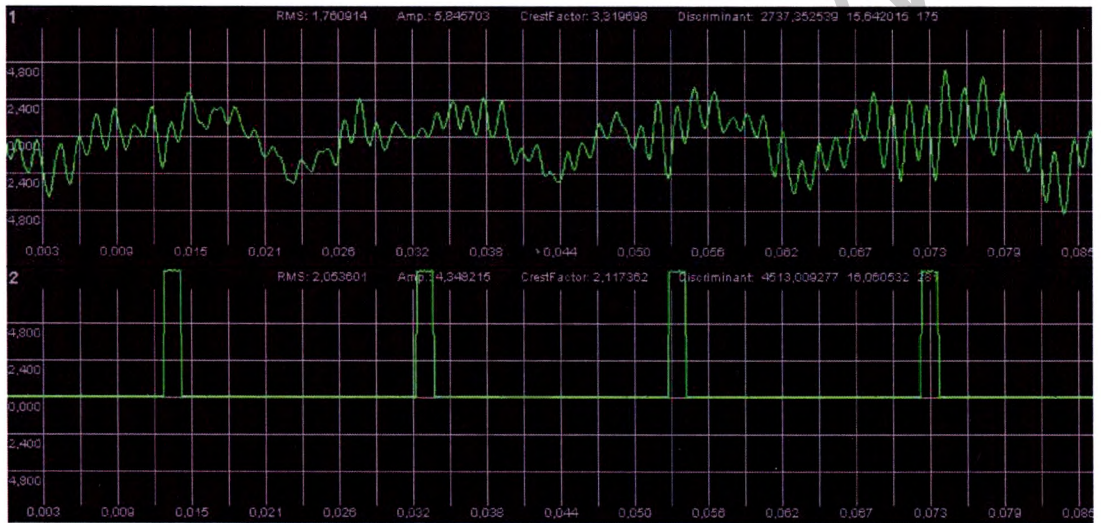


Рис. 2. Вибрационный сигнал и сигнал от датчика фазовой метки

Вычисление указанных параметров производится на интервале анализа T_a (временное окно наблюдения), который соответствует 5–10 оборотам вала, с помощью выражений:

$$C_k = \frac{2}{L} \sum_{j=0}^{L-1} x(j + I_n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi M \cdot kj}{L}\right); \quad (1)$$

$$S_k = \frac{2}{L} \sum_{j=0}^{L-1} x(j + I_n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi M \cdot kj}{L}\right); \quad (2)$$

$$A_k = \sqrt{C_k^2 + S_k^2}; \quad (3)$$

$$\phi_k = \arctg \frac{S_k}{C_k}; \quad (4)$$

$$L = I_\kappa - I_\mu, \quad (5)$$

где x_{j+I_μ} – j -ый отсчет вибросигнала, принятого параллельно с сигналом от датчика фазовой метки, и синхронизированный относительно момента первого выявленного прохождения фазовой метки;

k – номер оборотной составляющей, $k = 1, 2, 3, \dots$;

I_μ, I_κ – номера первого и последнего отсчетов анализируемого массива данных, которые соответствуют моментам первой и последней фиксации фазовой метки для принятых массивов данных;

M – количество оборотов вала, зафиксированных на интервале от I_μ до I_κ ;

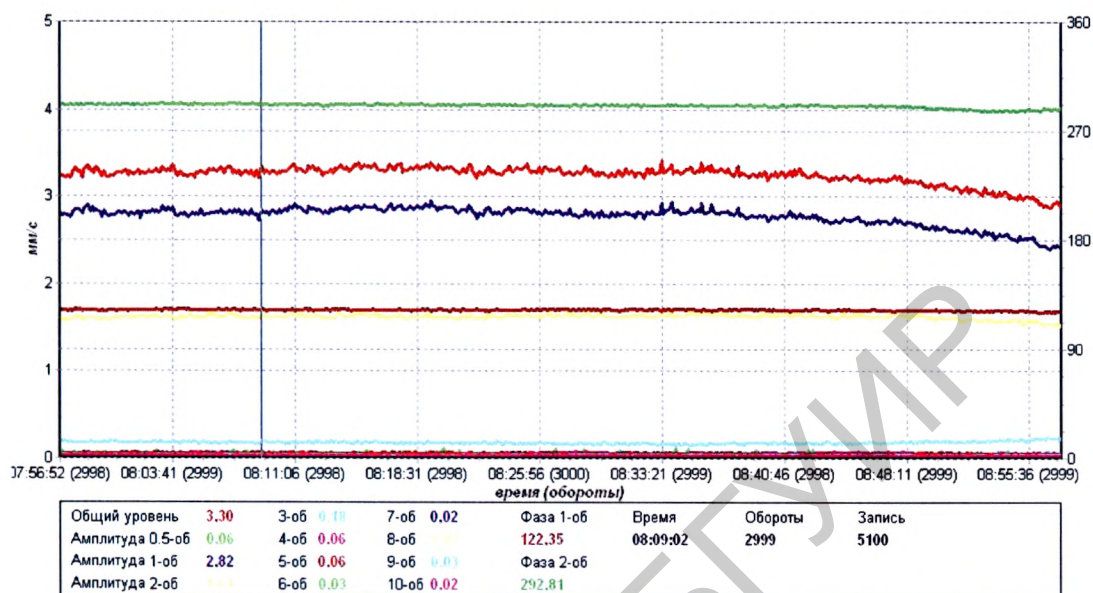
A_k, ϕ_k – амплитуда и начальная фаза k -ой оборотной составляющей.

Обычно исходный вибрационный сигнал представляется в единицах виброускорения, поэтому, при необходимости, выполняется его интегрирование (двойное интегрирование) во временной или частотной области для преобразования в единицы виброскорости или виброперемещения.

Продвигая временное окно наблюдения по временной шкале с некоторым шагом и вычисляя параметры для каждого его положения можно построить временной тренд параметров.

На рисунке 3 представлен пример изменения во времени (примерно час), параметров вибрации, зафиксированных при контроле вибрации подшипниковых опор турбоагрегата.

Визуальный анализ трендов параметров вибрации позволяет обнаружить возможные аномальности и оценить изменение технического состояния контролируемого объекта. Однако его проведение связано со значительными временными затратам специалиста в области вибрации, а для обоснованного принятия решений требуется получить численные оценки параметров обрабатываемых данных. Поэтому актуальна автоматизация этой процедуры.



**Дискрет Вероятность
(мм/с)**

0.00 / /0.0000 /
0.25 / /0.0000 /
0.50 / /0.0000 /
0.75 / /0.0000 /
1.00 / /0.0000 /
1.25 / /0.0000 /
1.50 / /0.0000 /
1.75 / /0.0000 /
2.00 / /0.0000 /
2.25 / /0.0000 /
2.50 / /0.0924 /
2.75 / /0.5456 /
3.00 / /0.3173 /
3.25 / /0.0447 /
3.50 / /0.0000 /
3.75 / /0.0000 /
4.00 / /0.0000 /
4.25 / /0.0000 /
4.50 / /0.0000 /
4.75 / /0.0000 /
5.00 / /0.0000 /

Среднее значение виброскорости за период наблюдения: 2.988
 СКЗ разброса значений виброскорости за период наблюдения: 0.162
 Максимальное значение: 3.415
 Минимальное значение: 2.5792
 Диапазон изменения: 0.8361
 Количество анализируемых отсчетов: 10800

Рис. 3. Тренд СКЗ виброскорости, оборотных составляющих, фазы первой и второй оборотных составляющих для подшипниковой опоры генератора при его нормальной работе и результаты статистической обработки временного тренда СКЗ виброскорости

На рисунке 3, помимо самих трендов, приведен пример их статистической обработки, в результате которой получена гистограмма распределения исследуемого параметра по уровню и численные значения характеристик его изменения. Вычисленные значения можно принять в качестве вектора информативно-значимых параметров для системы поддержки принятия решений по оценке изменения технического состояния контролируемого объекта. В качестве примера для сравнения на рисунке 4 приведены изменения параметров вибрации подшипниковой опоры турбины и результаты статистической обработки СКЗ виброскорости при возникновении дефекта.

Амплитудный диапазон для построения гистограммы выбирается с учетом реального вибрационного состояния контролируемого объекта и нормативных требований по уровню вибрации.

Анализируя полученные данные можно сделать ряд выводов.

При нормальном функционировании механизма:

- параметр *«СКЗ разброса значений виброскорости за период наблюдения»* имеет значительно меньшее значение по сравнению со *«Средним значением СКЗ виброскорости за период наблюдения»*;

- *«Среднее значение СКЗ виброскорости за период наблюдения»* попадает в квантиль максимальной вероятности гистограммы распределения;

- *«Диапазон изменения»* меньше, чем *«Среднее значением СКЗ виброскорости за период наблюдения»* (хотя при наличии случайных выбросов, помех или кратковременных значительных изменениях режима это условие может не выполняться);

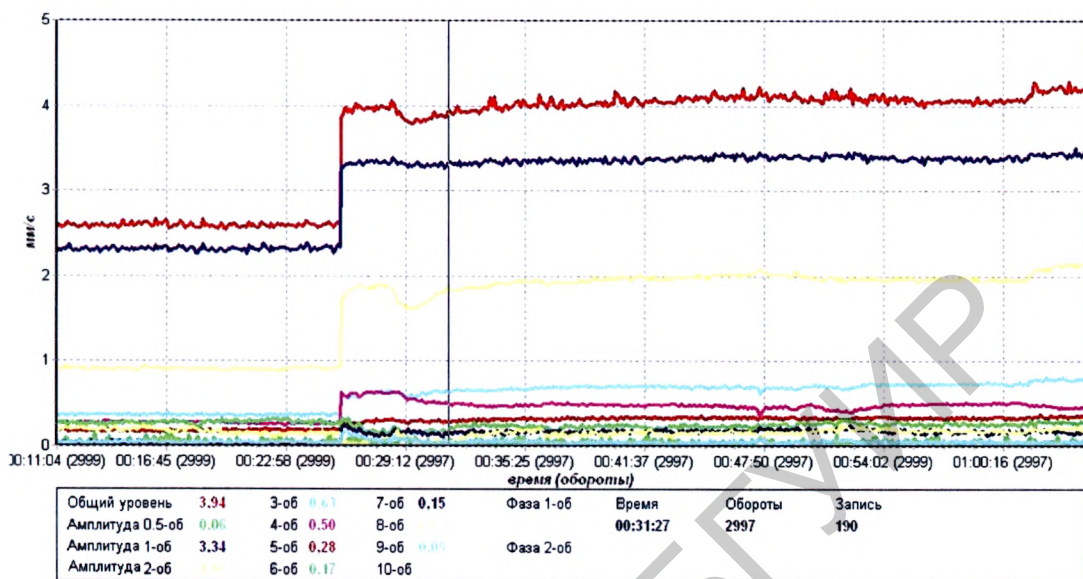
- форма гистограммы распределения по уровню для анализируемого параметра представляет собой несколько расположенных по соседству друг с другом значащих квантилей.

При возможном дефекте или неисправности механизма:

- параметр *«СКЗ разброса значений виброскорости за период наблюдения»* существенно больше, чем в исправном состоянии, и в ряде случаев сравним по величине со *«Средним значением СКЗ виброскорости за период наблюдения»*;

- *«Среднее значение СКЗ виброскорости за период наблюдения»* может не попадать в квантиль максимальной вероятности гистограммы распределения;

- *«Диапазон изменения»* сравним или даже превышает *«Среднее значением СКЗ виброскорости за период наблюдения»*;



Дискрет Вероятность
(мм/с)

0.00	/	0.0000	/
0.25	/	0.0000	/
0.50	/	0.0000	/
0.75	/	0.0000	/
1.00	/	0.0000	/
1.25	/	0.0000	/
1.50	/	0.0000	/
1.75	/	0.0000	/
2.00	/	0.0000	/
2.25	/	0.0000	/
2.50	/	0.0926	/
2.75	/	0.0000	/
3.00	/	0.0000	/
3.25	/	0.0000	/
3.50	/	0.0000	/
3.75	/	0.0630	/
4.00	/	0.3488	/
4.25	/	0.4869	/
4.50	/	0.0087	/
4.75	/	0.0000	/
5.00	/	0.0000	/

Среднее значение виброскорости за период наблюдения: 4.092
 СКЗ разброса значений виброскорости за период наблюдения: 0.4996
 Максимальное значение: 4.632
 Минимальное значение: 2.5395
 Диапазон изменения: 2.0928
 Количество анализируемых отсчетов: 1491

Рис. 4. Тренд СКЗ виброскорости и оборотных составляющих для подшипниковой опоры турбины при возникновении дефекта и результаты статистической обработки временного тренда СКЗ виброскорости

– форма гистограммы распределения по уровню для анализируемого параметра имеет произвольный вид, причем значащие квантили могут располагаться с разрывом по амплитудной шкале.

Таким образом, предварительно проведенная статистическая обработка временных трендов параметров вибрации значительно облегчает работу технического специалиста.

Параметр «Среднее значение СКЗ виброскорости за период наблюдения» – V_{med} , целесообразно использовать для общей оценки технического состояния контролируемого объекта. Для этого применяется решающая функция [16]:

$$FR(V_{med}) = \begin{cases} 0.25, & \text{если } V_{med} \leq V_A; \\ 0.5, & \text{если } V_A < V_{med} \leq V_B; \\ 0.75, & \text{если } V_B < V_{med} \leq V_C; \\ 1.0, & \text{если } V_C < V_{med}, \end{cases} \quad (6)$$

где V_A, V_B, V_C – значения СКЗ виброскорости, соответствующие граничным уровням технического состояния, причем $V_A < V_B < V_C$.

Конкретные величины этих уровней могут определяться:

- стандартами;
- путем анализа изменения вибрационного состояния достаточно большого числа однотипных объектов;
- на основе экспертных оценок.

Уровни обычно отличаются друг от друга на 4–8 дБ.

Если $FR(V_{med})=0.25$, то механизм находится в очень хорошем вибрационном состоянии (это обычно новые (после ремонта), прошедшие приработку машины). Если $FR(V_{med})=0.5$, то механизм находится в хорошем вибрационном состоянии и может эксплуатироваться без временных ограничений. Если $FR(V_{med})=0.75$, то на эксплуатацию механизма накладываются ограничения на допустимое время эксплуатации, обычно от нескольких дней до месяца. Если $FR(V_{med})=1$, то состояния механизма аварийно-опасное и требуется оперативное реагирование, вплоть до его остановки.

Однако, предоставляя обобщенную характеристику вибрационного состояния объекта на длительном временном интервале, параметр V_{med} не отражает изменения интенсивности вибрации на от-

дельных режимах работы, когда могут наблюдаться её существенные повышения, определяемые «максимальным значением» – V_{\max} . При оценке состояния по отношению к V_{\max} также можно применить решающую функцию вида (6), учитывая при этом режимные факторы и предварительно удалив из выборки возможные случайные выбросы.

Изменчивость V_{med} характеризуется величиной «СКЗ разброса значений виброскорости за период наблюдения» – S_V , а также диапазоном изменения – V_d . Установить граничные уровни решающей функции для этих параметров значительно сложнее. В качестве S_{VA} , V_{dA} могут быть приняты, увеличенные на 20–25 процентов, значения S_V, V_d , полученные при эксплуатации новых, приработанных машин, при прохождении ими всех типовых режимов эксплуатации. Границы зон В и С целесообразно выбирать на основе результатов длительной эксплуатации объектов контроля и с учетом экспертных оценок. Рост параметра S_V или V_d свидетельствует об определенном изменении технического состояния объекта, даже при незначительном увеличении V_{med} .

Выводы

Многолетний опыт эксплуатации компьютерных комплексов вибрационного контроля, мониторинга и защиты [4, 5, 7, 10] показал их хорошую точность при определении параметров вибрации, высокую надежность в работе и адаптируемость программных средств к решению возникающих проблем. Однако в настоящее время появляются и решаются новые задачи в области создания систем оценки технического состояния, поддержки принятия решений и диагностики по вибрационным параметрам. Расширение пропускной способности каналов передачи данных и развитие компьютерных интернет-технологий позволяют создавать подобные системы на основе распределенного сбора больших объемов виброметрических данных и программных средств их централизованной обработки как традиционного, так и браузерного исполнения, доступ к которым производится через интернет-ресурс.

Для более достоверных заключений представляется целесообразным проведение регистрации непрерывных вибрационных сигналов, отражающих техническое состояние объекта на достаточно длительном временном интервале (минуты, часы и даже сутки) и выпол-

нение многофункционального анализа полученных данных с последующим принятием решений.

Литература

1. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий и др. М.: Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. Bently, D.E. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics/ D.E. Bently, C.N. Hatch, B. Grissom. – Canada: Bently pressurized bearing company, 2002. – 726 pp.
3. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – Москва, 1996. – 276 с.
4. Бранцевич, П.Ю. Организация и опыт применения систем вибрационного мониторинга и защиты / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. / Под ред. Н.П. Мигуна – Мн.: Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2013. – с. 67–74.
5. Бранцевич, П.Ю. ИВК «Лукомль–2001» для вибрационного контроля / П.Ю. Бранцевич // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 12 (69), – с. 19–21.
6. Бранцевич, П.Ю. Решение задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния механизмов и турбоагрегатов с помощью компьютерных комплексов / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2 (88). – с. 148–152.
7. Бранцевич, П.Ю. Компьютерный вибрационный мониторинг механизмов и турбоагрегатов/ П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7 (93). – с. 5–10.
8. Фрэнкс, Б. Укрощение больших данных: как извлекать знания из массивов информации с помощью глубокой аналитики / Б. Фрэнкс; пер. с англ. А. Баранова. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. – 352 с.
9. Бранцевич, П.Ю. Большие данные в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / П.Ю. Бранцевич, Е.Н. Базылев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 3. – с. 28–41.
10. Brancevich, P. Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system / P. Brancevich, X. Miao, Y. Li // 20th International Congress on Sound and Vibration. Bangkok, Thailand, 7-11 July 2013. – Curran Associates, Inc., NY 12571 USA, –pp. 612-619.
11. Бранцевич, П.Ю. Разработка методики, алгоритмов, программных средств оценки технического состояния сложных механизмов с вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев; УО «БГУИР». – Мн., 2015. – 223 с.: Деп. в ГУ «БелИСА» 16.13.2016 г., № Д201603.
12. ГОСТ ИСО 10816–1–97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. – Введ. 1999–07–01. – Минск. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартиформ, 2007. – 18 с.

13. ГОСТ 25364-97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. – Введ. 1999-07-01. – Минск. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартинформ, 2011.– 12 с.
14. Бранцевич, П.Ю. Методика применения измерительно-вычислительного комплекса "Тембр-М" при оценке вибрационного состояния механизмов и агрегатов / Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2014) : сб. статей IV международной заочной научно-технической конференции / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: Изд-во: ПВГУС, 2014. – с. 55–67.
15. Базылев, Е.Н. Особенности применения встроенных систем в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / Е.Н. Базылев, П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии = International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies [Электронный ресурс] : материалы междунар. науч. конгресса, Республика Беларусь, Минск, 24–27 окт. 2016 г. – Минск : БГУ, 2016. – С. 759–762.
16. Фор, А. Восприятие и распознавание образов. – М.: Машиностроение, 1989. –272

Статья поступила в редакцию 30.05.17