

УДК 620.179.12

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ, МОНИТОРИНГА, ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ И ТУРБОАГРЕГАТОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

П.Ю. БРАНЦЕВИЧ, С.Ф. КОСТЮК, Е.Н. БАЗЫЛЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 20 января 2015*

### Введение

Возрастающая конкуренция на потребительских рынках требует от производителей продукции и поставщиков услуг повышения эффективности производства и производительности труда, снижения эксплуатационных издержек. При этом в ряде случаев, это приводит к тому, что повышается интенсивность эксплуатации машин и оборудования, увеличиваются нагрузочные режимы их работы, а это, в свою очередь, приводит к их скорейшему износу и повышению вероятности возникновения отказов и аварийных ситуаций.

В таких условиях важнейшей задачей является разработка эффективных средств контроля параметров технического состояния эксплуатируемых оборудования, устройств, машин и агрегатов. 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 (турбины, генераторы, двигатели, редукторы, насосы, компрессоры, вентиляторы и т.д.), которые считаются наиболее изнашиваемыми, такими являются параметры вибрации [1–4].

### 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 или сборщиков виброданных определяются параметры вибрации подшипниковых опор [5–6], 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 об/мин 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 аварийно-опасные ситуации путем отключения оборудования или изменения режимов его работы.

Системы непрерывного стационарного мониторинга, выполняющие непрерывного вибрационного контроля, внедряют на сложных дорогостоящих агрегатах (турбогенераторах, газоперекачивающих агрегатах и т.п.) [7]. Это многоканальные, в большинстве случаев компьютерные системы, определяющие и регистрирующие на каком-то носителе информации значения параметров вибрации через небольшие (не более нескольких секунд) промежутки времени, а также осуществляющие допусковый контроль, функции сигнализации и даже защитного отключения. Примером такой системы является измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) серии «Лукомль», разработанный и производимый научно-исследовательской лабораторией вибродиагностических систем БГУИР [8].

Структурно ИВК представляет собой компьютер с типизированным модулем АЦП, подключаемым к ее стандартному интерфейсу (PCI, USB), блока аналоговой обработки сигналов, к которому подключаются первичные виброизмерительные каналы, и блока управления сигнализацией и защитным отключением. По сути, это перепрограммируемый компьютерный измерительный прибор, решающий специальные задачи. Его основными функциями являются:

- определение в режиме реального времени интенсивности вибрации в стандартизованных или задаваемых частотных диапазонах, частоты вращения вала, значений амплитудных и фазовых параметров, по крайней мере, 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.

Комплекс используется в качестве штатной системы вибрационного контроля, мониторинга и защиты крупнейших турбоагрегатов на электростанциях Беларуси (рис. 1).

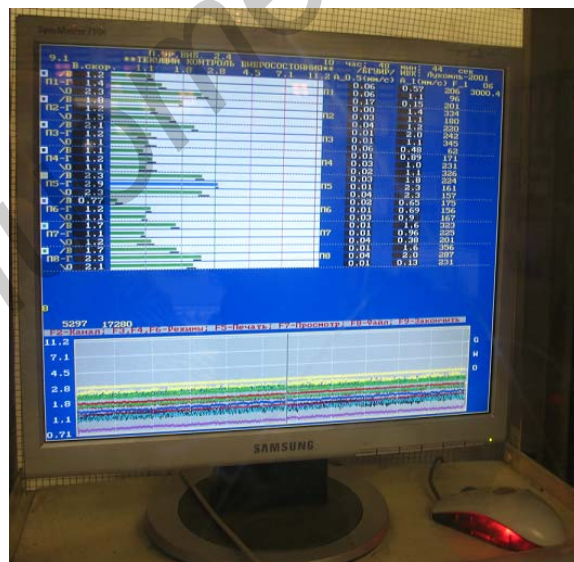


Рис. 1 Представление результатов вибрационного контроля турбоагрегата в ИВК серии «Лукомль»

За время эксплуатации комплекса получен ряд достаточно интересных данных. На рис. 2 представлен пример развития вибрационной ситуации на турбоагрегате мощностью 250 МВт, повлекшей за собой остановку турбоагрегата.

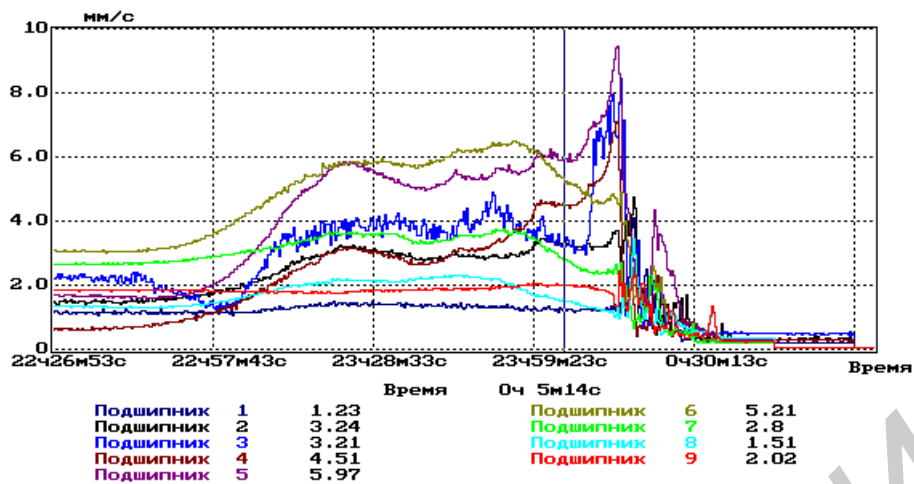


Рис. 2. Изменение СКЗ виброскорости вибрации подшипниковых опор турбоагрегата мощностью 250 МВт

Данная ситуация характерна тем, что ухудшение вибрационного состояния контролируемого объекта происходило на достаточно длительном (более 1,5 ч.) 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 скользящих подшипниковых опор при прогреве. На рис. 3 и 4 показаны тренды вибрации подшипниковых опор турбоагрегатов, которые были зафиксированы при обрывах лопатки.

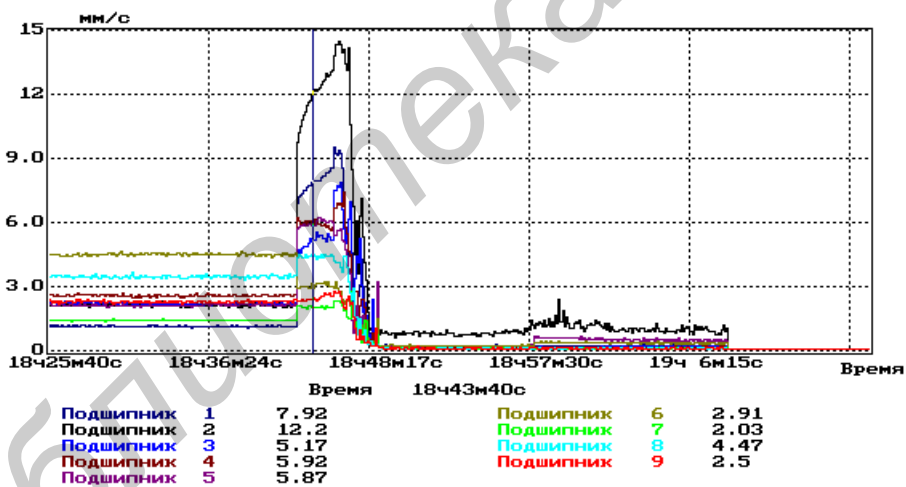


Рис. 3. Пример изменения СКЗ виброскорости вибрации подшипниковых опор турбоагрегата мощностью 300 мегаватт при обрыве лопатки

В этом случае (рис. 3) обрыв лопатки привел к возникновению большого дисбаланса, при этом изменение общего уровня СКЗ виброскорости было большим и, в основном, обуславливалось изменением амплитуды первой оборотной составляющей вибрации. Фаза первой оборотной составляющей вибрации изменилась почти на 180 градусов, что говорит об изменении вектора первой оборотной составляющей на значительно большую величину, чем просто изменение ее амплитуды. Решение об остановке турбоагрегата было принято в считанные минуты.

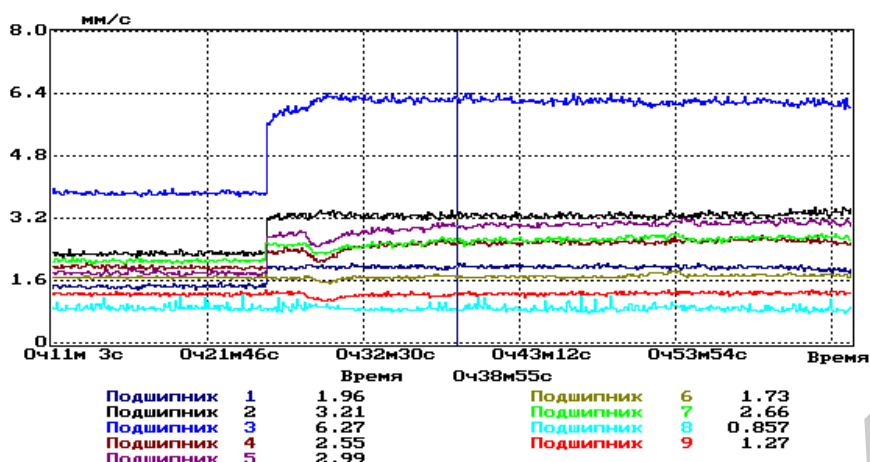


Рис. 4. Пример изменения СКЗ виброскорости вибрации подшипниковых опор турбоагрегата мощностью 100 МВт при обрыве лопатки

В примере, представленном на рис. 4, обрыв нескольких лопаток также привел к скачкообразному изменению СКЗ виброскорости вибраций подшипниковых опор. Однако это изменение было не слишком велико, а абсолютные уровни вибрации не достигли критических значений. При этом изменение общего уровня вибрации обуславливалось изменением амплитуды не только первой оборотной составляющей вибрации, но и второй, третьей и четвертой оборотных составляющих, а фаза первой оборотной составляющей вибрации практически не изменилась. Решение об остановке турбоагрегата было принято после дополнительного анализа возникшей ситуации в течение нескольких часов. Рассмотренные примеры свидетельствуют о том, что изменение вибрационного состояния сложных технических объектов при возникновении дефектов даже одинакового типа может быть весьма сложным и разнообразным, и реализовать системы автоматической защиты таких механизмов, руководствуясь только рекомендациями стандартов [7], весьма проблематично.

### Защита по параметрам вибрации

Наиболее важной задачей современных систем вибрационного контроля, мониторинга и защиты является предотвращение аварийного повреждения технического 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 остановки технического объекта, во многих случаях имеет неоднозначное отображение в параметры вибрации. Стандартизованные критерии защиты отражают наиболее общие взаимосвязи, полученные на основе длительного опыта эксплуатации и исследования механизмов с вращательным движением, и далеко 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 срабатываний защитного отключения («ложная тревога») и не допустить «пропуска дефекта».

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

1. *Фактор низкочастотной составляющей вибрации.* Под низкочастотной вибрацией (НЧВ) понимается СКЗ 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 с 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 и рабочими частотами механизма.

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 промежутке времени 3-6 сек.

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

### **Заключение**

Опыт эксплуатации систем вибрационного мониторинга показывает их достаточно высокую эффективность. Однако решение задач вибрационной диагностики до настоящего времени остается проблематичным. 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 выполнение многофункционального анализа полученных данных.

### **Список литературы**

1. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва, 1996.
2. Bently D.E., Hatch C.N., Grissom B. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Canada, 2002.
3. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. М., 1999.
4. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. СПб, 2000.
5. Бранцевич П.Ю. // Сборник матер. 12-ой науч.-технич. конф. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». М., 2000. С. 170–171.
6. Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф. // Мат. 4-ой Междун. науч.-техн. конф. «Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов». Гродно, 2001. Ч.2. С. 69–72.
7. ISO 10816. Mechanical vibration. Evolution of machine vibration by measurements on non- rotating parts. Part 1–5.
8. Бранцевич П.Ю. // Энергетика и ТЭК. 2008. № 12 (69). С. 19–21.