



А. А. КУЗЕМБАЕВ, РУП «БМЗ»

УДК 658.58

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НА РУП «БМЗ»

Введение

Работа предприятия в новых экономических условиях свободного рынка ставит перед системой технического обслуживания оборудования более высокие требования по поддержанию оборудования в работоспособном состоянии, обеспечению качества выпускаемой продукции, ликвидации аварий и внеплановых простоев оборудования. В свете решения этих проблем актуальной становится задача оценки истинного технического состояния объекта с целью своевременного вмешательства обслуживающего или ремонтного персонала для восстановления работоспособности объекта и обеспечения заданных параметров и функций, а также своевременного и достаточного планирования запасных частей, материалов, трудовых ресурсов для проведения ремонтных работ. Решение поставленных задач возможно на основе данных контроля вибрации. Разработка эффективных средств уменьшения вибрации невозможна без знания источников повышенной вибрации, причин ее возникновения и основных путей распространения по конструкциям, что требует, в свою очередь, развития методов виброакустических исследований и наличия соответствующей аппаратуры виброакустической диагностики.

Основными источниками повышения виброактивности механизмов в процессе эксплуатации являются дефектообразование в подшипниках качения, неуравновешенность (дисбаланс) роторов и дефекты сборки машин. Подшипник качения — наиболее распространенный элемент конструкции любого роторного механизма и в то же время наиболее уязвимый элемент. Подшипники осуществляют пространственную фиксацию вращающихся роторов и, следовательно, воспринимают большую часть статических и динамических усилий, возникающих в работающем механизме. Вибродиагностика состояния подшипников качения в настоящее время одна из наиболее развитых, разработанных областей виброметрии как в теоретическом плане, так и в плане практической аппаратурной реализации.

The review of technical diagnostics and crack detection at RUP "BMZ" is given in the article and there are reflected the functions and tasks of the Laboratory of Technical Diagnostics and Crack detection (LTDandC). The examples of determination of the equipment failure by methods of vibration diagnostics, applied in LTDandC, are given and the efficiency of using of the system of technical servicing of the equipment according to "state" is shown. The idea of transfer from the repairs system "according to schedule" to repairs "according to state" using new information technologies such as vibrating monitoring and vibrating diagnostics is briefly reflected in the article.

Задачи и объекты вибромониторинга и диагностики на РУП «БМЗ»

С середины 90-х годов на РУП «БМЗ» почти не проводили обновление основных фондов предприятий. Это привело к тому, что большая часть (60–80%) технологического оборудования металлургических производств завода выработало нормативный ресурс и его дальнейшая эксплуатация уже приводит к созданию аварийных ситуаций. С целью технического перевооружения металлургического комплекса, метизного производства, руководством БМЗ разработана и утверждена программа реконструкции завода, которая предусматривает постепенное обновление основной части оборудования.

В связи с изложенным выше для обеспечения безопасной эксплуатации ныне действующего и вновь устанавливаемого оборудования все с большей остротой встает вопрос его технического диагностирования.

В апреле 1990 г. на Белорусском металлургическом заводе была создана лаборатория технической диагностики и дефектоскопии (ЛТДиД) как структурное подразделение службы главного механика. ЛТДиД состоит из двух групп: по вибродиагностике и дефектоскопии.

Лаборатория технической диагностики и дефектоскопии занимается решением технических вопросов и задач, связанных с организацией и проведением виброконтроля и вибродиагностики, конечной целью которой является переход от системы ремонтов «по регламенту» к ремонтам «по состоянию». Вибромониторинг и вибродиагностика как часть программы предсказуемого (предупредительного) ремонта помогают решать задачи в обеспечении высокой эффективности работы как новых машин, так и тех, которые уже отработали свой безаварийный ресурс. Преимущество перехода от системы ремонтов «по регламенту» к ремонтам «по состоянию» заключается в следующем:

- снижаются потери продукции;
- повышаются производительность, эффективность, надежность, срок эксплуатации оборудования;

- уменьшаются ремонтные затраты (снижается время ремонта, количество запасных частей и стоимость складских расходов, горючего);
- улучшается планирование ремонтных работ;
- повышаются технологическая и экологическая безопасность.

Специалисты ЛТДиД выполняют работы по дефектоскопии ответственных деталей, элементов металлоконструкций и сварных соединений металлургического оборудования и объектов, подконтрольных Проматомнадзору Республики Беларусь и эксплуатируемых на РУП «БМЗ», с целью своевременного определения имеющихся или возникающих в процессе эксплуатации дефектов и отклонений от требований нормативно-технической документации. После выполнения всех перечисленных выше работ выдается заключение о пригодности этих объектов к дальнейшей безопасной эксплуатации или выдаются рекомендации по устранению дефектов.

ЛТДиД выполняет также и виброналадочные работы на машинах и механизмах по заявкам соответствующих цеховых служб. Это балансировка рабочих колес и роторов на месте эксплуатации оборудования, т.е. без разборки машин и механизмов [1]. Применение балансировки в собственных опорах позволило отказаться от таких операций, как демонтаж, транспортировка к месту балансировки, балансировка (г. Гродно), транспортировка и монтаж на месте эксплуатации. Эффект от балансировки только одного колеса вентилятора ПГУ в ЭСПЦ на месте эксплуатации составил 11 840 тыс. руб. в ценах 1998 г. [2]. С этого времени колеса балансируются только по месту эксплуатации. Специалисты ЛТДиД дают консультации по вопросам качественного проведения узлового ремонта роторного оборудования. Результатом этих консультаций является балансировка роторов и валов в сборе на балансировочных станках нового поколения, закупленных и установленных фирмой «ДИАМЕХ» (г. Москва) [2].

Устранение несоосности валов роторного оборудования, как один из видов виброналадочных работ, выполняется специалистами ЛТДиД с помощью современного измерительного комплекса «COMBI-LASER» (Швеция). Это позволяет быстро и более точно выполнять данные работы, что ведет к сокращению времени простоя оборудования и качественному выполнению наладочных работ. С помощью этого прибора были выполнены работы по установке и центровке всего роторного оборудования стана 150 во время его строительства. Австрийская фирма «Фёст-Альпине», проводившая шеф-монтаж стана 150, дала высокую оценку выполнения работ по выверке соосности роторного оборудования [2].

Основные методы мониторинга и диагностики, применяемые в ЛТДиД

В настоящее время в вибродиагностике используются, по крайней мере, четыре метода оценки технического состояния подшипников качения: метод прямого спектра; метод спектра огибающей; метод ударных импульсов; метод ПИК фактора.

Диагностические задачи, выполняемые специалистами ЛТДиД, решаются разными методами, часто дублирующими друг друга, с использованием переносных систем вибрационной диагностики, не требующих встраивания измерительных датчиков в оборудование и его узлы. Это вибрo-анализаторы-сборщики данных СД-12, КВАРЦ и приборы SPM технологий – А-30, Т-2001 (Швеция) и др. Все перечисленные приборы работают с программным обеспечением по диагностике и вибромониторингу оборудования [3, 4].

Эффективность применения системы технического обслуживания по «состоянию» можно показать на примере диагностики проволочной линии – блока «Морган». В августе 2003 г. после текущих плановых измерений прибором СД-12 и последующего анализа данных в программе «DREAM» на блоке «Морган» был обнаружен дефект на валу редукторной «кассеты» №30. С помощью диагностической программы «DREAM» [3] и неоднократных измерений было произведено глубокое диагностирование с прогнозированием технического состояния этого редуктора до ближайшего планового ремонта. Службой по ремонтам УРТО прокатного цеха было принято решение вскрыть редуктор №30. После остановки оборудования и проведения осмотра были обнаружены ослабление посадки шестерни с $Z=31$ на ведомом валу конической передачи и дефект в шпоночном соединении шестерни с валом (смятие шпонки). Обнаруженный дефект по степени развития был значительным, поэтому дальнейшая эксплуатация редуктора №30 с такими дефектами привела бы к аварийной остановке блока «Морган» и всей проволочной линии стана 150 со следующими последствиями:

- поломка корпуса редуктора и выход из строя всех деталей редуктора;
- аварийный простой всего прокатного стана 150 в течение, как минимум, 4 сут. (аварийный простой блока из-за поломки редуктора №28 в 2000 г. составил 11 сут.).

Экономический эффект от предотвращения такой аварии составил 202 998 174 руб.

Рассмотрим наиболее эффективные методы при минимуме затрат на аппаратуру и подготовку специалистов для проведения измерений и постановки диагноза. Естественно, что такой подход требует определенных ограничений на номенклатуру объектов диагностики. Основным методом вибрационного мониторинга – наблюдение за изменением виброэнергетических параметров вибрации машины и прежде всего мощности (уровня) отдельных компонент вибрации. Особенности любого подхода к решению задач мониторинга определяются тремя главными факторами: выбором точек измерения вибрации, количества разделяемых компонент и интервалов между измерениями. Чтобы увеличить количество компонент вибрации в машинах с вращающимися узлами, проводится узкополосный спектральный анализ вибрации, наиболее эффективный для анализа периодических компонент сигнала [5]. В качестве

примера на рис. 1 приведены спектры вибрации редуктора №30 блока «Морган» без дефектов и после появления дефектов шестерен, сопровождающихся ростом уровня (мощности) многих составляющих спектра вибрации [2].

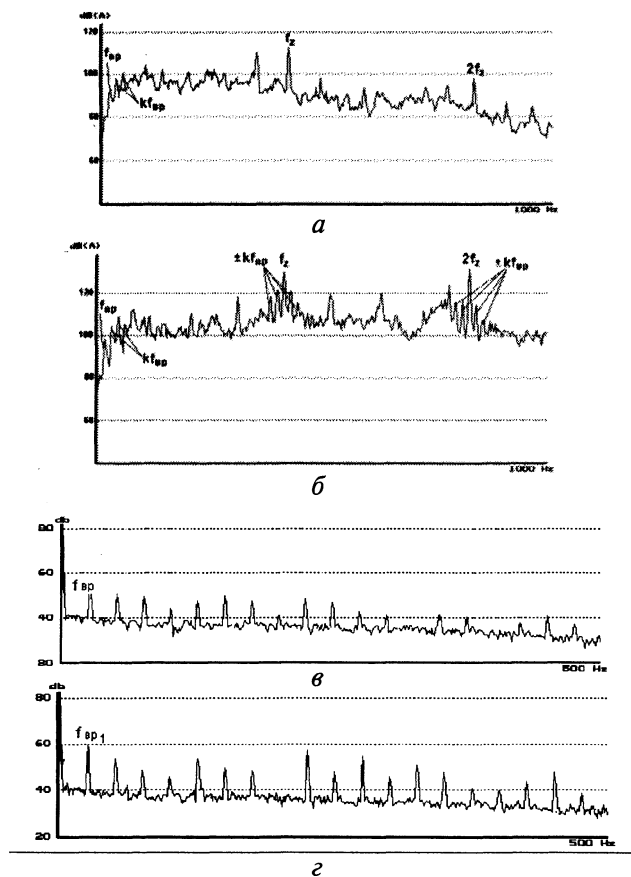


Рис. 1. Спектры вибрации подшипникового узла редуктора №30 блока «Морган»: а, б — бездефектный редуктор; в, г — редуктор с дефектом шестерни; $f_{шп}$ — частота вращения вала редуктора; f_z — зубцовая частота

Мониторинг вибрационного состояния машины, например вентилятора закалочных колдцев стана 850, заключается в сравнении уровня отдельных составляющих с указанными на рис. 2 порогоми и проводится анализ изменений уровня отдельных составляющих за время эксплуатации.

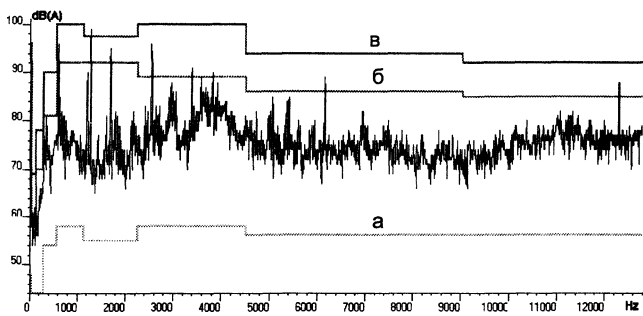


Рис. 2. Мониторинг вибрационного состояния вентилятора: а — порог слабого сигнала вибрации; б — порог среднего сигнала вибрации; в — порог сильного сигнала вибрации

Для обнаружения зарождающихся дефектов во вращающихся узлах используются диагностические признаки, определяемые путем спектрального анализа самого сигнала вибрации или колебаний мощности его компонент (спектральный анализ огибающей). Так, основным признаком дефектов в подшипниках является изменение свойств сил трения и возбуждаемой ими высокочастотной вибрации [6]. Эти изменения, заключающиеся либо в появлении микроударов, либо в периодическом изменении коэффициента трения при контакте дефектных участков поверхностей трения, легко обнаруживаются при спектральном анализе огибающей высокочастотных составляющих вибрации корпуса подшипникового узла, например редуктора клетки №1 стана 320 (рис. 3) [2].

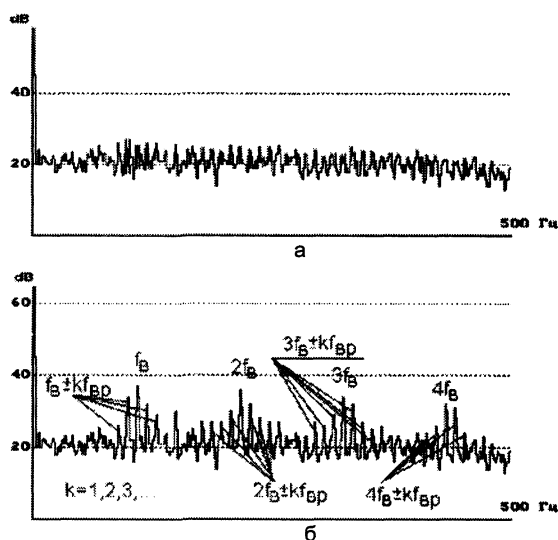


Рис. 3. Спектр огибающей вибрации подшипника редуктора клетки №1 (входной вал) без дефектов (а) и подшипника с раковинной на внутреннем кольце (б): $f_{шп}$ — частота вращения внутреннего кольца подшипника; $f_в$ — частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу подшипника

При диагностировании рабочих колес насосов удается обнаруживать такие дефекты, как бой колеса, износ лопастей, кавитация. На рис. 4, а приведены спектры огибающей вибрации корпуса насоса в нормальном режиме работы, а на рис. 4, б — при износе (трещине) в одной из лопастей.

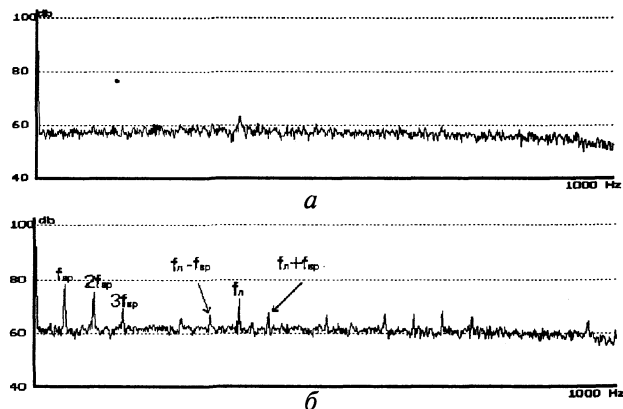


Рис. 4. Спектры огибающей вибрации корпуса насоса при отсутствии дефектов (а), при износе лопасти рабочего колеса (б): $f_{шп}$ — частота вращения рабочего колеса, f_n — лопастная частота

В диагностике электромагнитных систем электрических машин качественный скачок произошел в 1982 г., когда специалисты предприятия “Виброакустические системы и технологии” предложили диагностировать их по пульсирующим электромагнитным моментам, возникающим при дефектах обмоток или нарушениях симметрии воздушных зазоров. При одних видах дефектов (беличьей клетке асинхронного двигателя) появляются пульсирующие моменты на инфранизких частотах, что приводит к пульсации скорости вращения ротора. Такие пульсации скорости легко обнаружить по узкополосному спектру низкочастотной вибрации. Другие дефекты (обмотки статора машин переменного тока) создают пульсирующие моменты на низких частотах, что приводит к росту вибрации машины, измеренной по касательной к корпусу в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Для обнаружения такого роста сравнивается вибрация в одной точке в радиальном к оси направлении

и по касательной. Ряд дефектов (нарушение симметрии зазоров) сопровождается появлением пульсирующих моментов на более высоких частотах, на которых разделить вибрацию, возбуждаемую радиальными силами и пульсирующими моментами, оказывается практически невозможно. В таких случаях положительный результат дает анализ пульсации электромагнитного поля, являющихся одной из составляющих, которые возбуждают пульсирующие моменты. Эти составляющие поля возбуждают вибрацию машины на «зубцовой» частоте, аналогично зубцовой частоте шестерен в редукторах. «Зубцовая» вибрация при дефектах оказывается модулирована по амплитуде, что обнаруживается при узкополосном спектральном анализе вибрации [5]. В качестве примера на рис. 5, а, б представлены спектры вибрации асинхронного электродвигателя ($P=1\text{ МВт}$) вентилятора газоочистки ПГУ сталеплавильного цеха с различными дефектами электромагнитной системы [2].

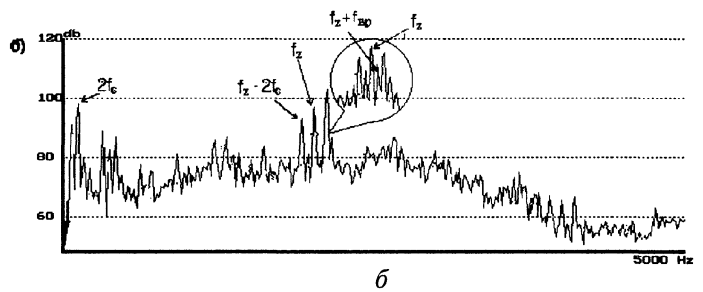
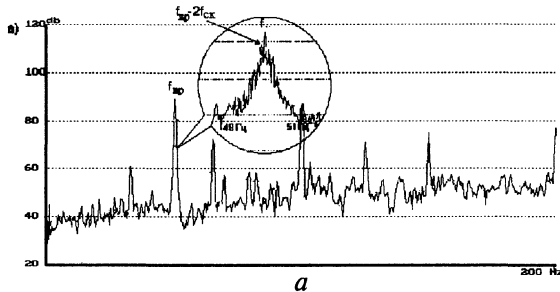


Рис. 5. Спектры вибрации бездефектного асинхронного электродвигателя ПГУ (а) (на выделенном участке спектра показано изменение при обрыве стержня беличьей клетки); спектры вибрации этого же электродвигателя (б) (на выделенном участке спектра показано изменение при появлении короткозамкнутого витка); $f_{\text{к}}$ – частота скольжения в асинхронном двигателе; $f_{\text{с}}$ – частота питающего напряжения; $f_{\text{з}}$ – зубцовая частота

Спектральный анализ вибрации электрических машин (трансформаторов) на низких и средних частотах, измеряемой в разных направлениях, дает возможность идентифицировать практически все дефекты электромагнитной системы, кроме старения изоляции, так как до момента пробоя изоляции электромагнитное поле и вибрация машины не изменяются.

На рис. 6, а приведены формы сигналов вибрации трансформатора ($P=6,3\text{ МВт}$) без дефектов, а на рис. 6, б – формы сигналов вибрации трансформатора с магнитным насыщением активного сердечника.

Из рисунка видно, что появление магнитного насыщения активного сердечника сопровождается искажением формы и ростом составляющих вибрации на гармониках питающего напряжения.

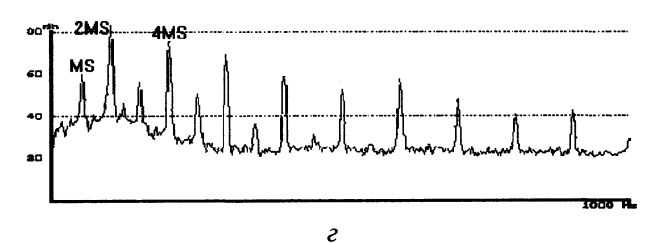
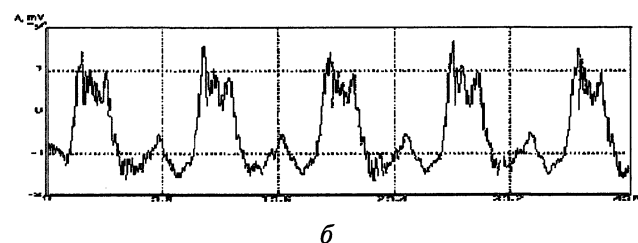
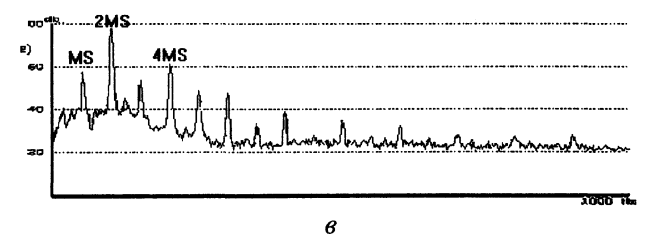
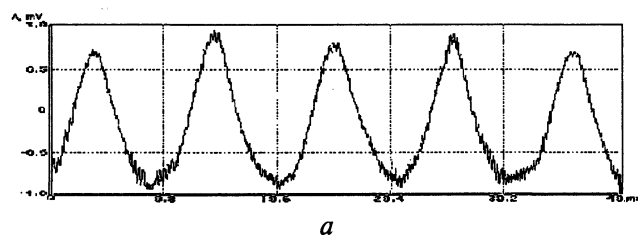


Рис. 6. Формы и спектры вибрации сердечника трансформатора, работающего в нормальном режиме (а, в), при перегрузке, сопровождающейся магнитным насыщением сердечника (б, г). МС – частота питающего напряжения

Параллельно развитию систем мониторинга на базе уже существующих информационных технологий во многих странах шел поиск новых методов анализа сигналов для решения диагностических задач. Так, в 1968 г. специалистами Швеции был запатентован метод, давший понятие информационной технологии ударных импульсов (технология SPM-Shock Pulse Method), которая дала начало многим поколениям систем диагностики подшипников качения. Принцип действия метода ударных импульсов приведен на рис. 7.

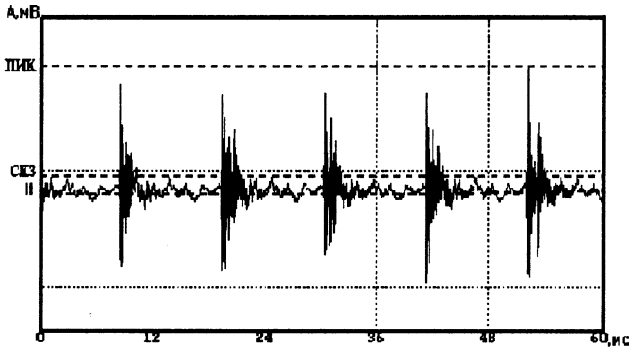


Рис. 7. Вибрация, возбуждаемая ударными импульсами

Из рисунка видно, что вибрация, возбуждаемая короткими импульсами, значительно изменяет мгновенную (пиковую) амплитуду сигнала, практически не изменяя ее среднее квадратичное значение (мощность). Отношение пикового значения (пик) к среднее квадратичному (СКЗ), называемое пик-фактором, является тем параметром, который реагирует на появление отдельных коротких импульсов:

$$\text{пик-фактор} = \frac{\text{ПИК}}{\text{СКЗ}} \approx 15.$$

Так, у случайного сигнала без ударных импульсов типовое значение пик-фактора составляет от 3 до 4, а при появлении редких, но сильных импульсов может превышать значения порядка 20–30. Именно в подшипниках качения при плохой смазке или появлении раковин на поверхностях качения возникают такие импульсы [7].

Приведенный краткий анализ основных методов обработки сигналов позволяет производить оценку практически всех информационных технологий, используемых в современных системах мониторинга и функциональной диагностики машин и оборудования.

Таким образом, по сигналу вибрации могут быть обнаружены практически все виды зарождающихся дефектов на механическом и энергетическом оборудовании без привлечения для диагностики других видов физических процессов. А это означает, что для перехода на обслуживание и ремонт этого оборудования по фактическому состоянию могут использоваться как переносные системы вибрационной диагностики, не требующие встраивания измерительных датчиков в оборудование и его узлы, так и стационарные, в

которых датчики вибрации встроены в узлы роторного оборудования. В перспективе на РУП "БМЗ" решается вопрос о внедрении стационарной системы технической диагностики на прокатном оборудовании проволочной линии блока «Морган» и на редукторах стана 150 (монтаж полустационарной системы контроля и сбора данных). В настоящее время на заводе не решена проблема диагностики машин с возвратно-поступательным движением. Это насосы фирмы «Zulzer» в компрессорно-кислородном цехе (ККЦ) и насосы высокого давления воды по сбиву окалины в СПЦ. Внедрение стационарных систем вибродиагностики и применение современных средств и методов технической диагностики оборудования позволит выйти на качественно новый, более высокий уровень решения задач службы технического обслуживания — переход от системы ремонтов «по регламенту» к ремонтам «по состоянию».

Опыт других стран и предприятий

Средства и методы виброметрии используются давно. Наиболее наглядным подтверждением этому является большое количество крупных приборостроительных фирм, специализирующихся на выпуске подобной техники и оказании услуг по диагностике:

- Шенк (Германия);
- Брюль и Кьер (Дания);
- Бентли-Невада, Продера, Хьюлетт-Паккард (США);
- Шлюмберже (Франция);
- Entek IRD International (Великобритания);
- ТЕАС (Япония);
- Диамех, ВАСТ (Россия).

В системе технического обслуживания и специфике применения существует множество особенностей. Например, в США в сфере газоперекачки (кстати, там это госпредприятия) на станциях (персонал несколько человек, а у нас — сотни) широко используются анализаторы-сборщики и все данные со всех станций страны передаются по каналам связи в единый обрабатывающий центр (Детройт), где и принимаются решения по всему газоперекачивающему оборудованию страны [8].

Например, в Финляндии вообще не существует трамвайных парков, трамваи ходят круглосуточно, нет никаких депо. В случае поломки вагон просто отправляют изготовителю, если еще не истек гарантийный срок (около 5 лет), либо выбрасывают в металлолом [8].

Лидирующее положение в Беларуси в области технического диагностирования энергомеханического оборудования занимают предприятия нефтеперерабатывающего комплекса, транспортировка нефти и газа, предприятия по выработке электроэнергии и тепла (ТЭЦ, ГРЭС и др.) и желез-

нодорожный транспорт. На Мозырском нефтеперерабатывающем заводе экономически оправдано применение на основном технологическом оборудовании подшипников фирмы SKF. На Молдавском металлургическом заводе более трех лет с успехом эксплуатируется стационарная система вибродиагностики на проволочной линии при производстве катанки. На всех крупных металлургических заводах России применяются стационарные (встроенные) системы диагностики роторного оборудования, где невозможно применить переносные системы вибродиагностики из-за недоступности к отдельным узлам механизмов. Опыта применения и эксплуатации стационарных систем технической вибродиагностики РУП «БМЗ» не имеет.

Литература

1. Пакет прикладных программ для балансировки роторов в собственных опорах // Инструкция по эксплуатации. Ч. 3. Санкт-Петербург, 1993.
2. Протоколы, акты, отчеты ЛТДиД. РУП «БМЗ».
3. Пакет прикладных программ для диагностирования и прогнозирования состояния подшипников качения // Инструкция по эксплуатации. Ч. 3, 4. Санкт-Петербург, 1992.
4. Пакет прикладных программ для мониторинга состояния машин и оборудования.
5. Баркова И.А. Современное состояние виброакустической диагностики машин.
6. Барков А.В. Диагностирование и прогнозирование состояния подшипников качения по сигналу вибрации // Судостроение. 1985. №3. С. 21–23.
7. Баркова Н.А. Виброакустические методы диагностики СЭУ. Л.: Изд-во Ленинград. кораблестр. ин-та, 1986.
8. Фирма «Ресурс». <http://www.resurs.spb.ru>.