

Примеры применения

Мониторизация состояния машинного оборудования
путем
анализа механических колебаний

Опыт применения мониторизации на
железном руднике



Мониторизация состояния машинного оборудования путем анализа механических колебаний

Опыт применения мониторизации на железном руднике

Д. Н. Браун, Й. Ц. Йэргенсен
Брюль и Къер

Введение

В горнодобывающей промышленности наблюдается тенденция к увеличению размеров, сложности и производительности оборудования. Вследствие увеличения как размеров оборудования, так и капитальных затрат на его приобретение простой этого оборудования отражается на увеличении эксплуатационных расходов, затрат на техническое обслуживание и потерю продукции. Это привело к повышению интереса к таким схемам технического обслуживания, которые обеспечивают максимальное время бесперебойной эксплуатации. Единственным действенным решением данной проблемы является внедрение профилактического технического обслуживания, заключающегося в определении состояния машинного оборудования и проведении ремонта только тогда, когда результаты измерений указывают на его необходимость.

В данной брошюре подробно описывается одна из таких программ профилактического технического обслуживания, которая используется на же-

лезном руднике Квебек Картье в Маунт-Райте, Канада. Программа мониторизации механических колебаний успешно используется здесь на целом ряде важных стадий процесса добычи с достижением весьма значительных результатов.

На ковшовых экскаваторах проводится мониторизация состояния моторгидраторной установки, подъемной и поворотной трансмиссии, а также специального привода марки Magnetorque®. На грузовиках, используемых для транспортировки руды к установкам первичного дробления, программа мониторизации охватывает дизельные двигатели и генераторы. На обогатительных установках рудника контролируются дробилки, насосы и конвейеры.

Ниже приводится подробное описание программы мониторизации, используемой на руднике в Маунт-Райте, и целый ряд примеров успешного использования системы мониторизации механических колебаний для выявления и диагностики неисправностей.

Применение мониторизации механических колебаний на руднике привело к значительной экономии эксплуатационных расходов и затрат на проведение технического обслуживания оборудования. Некоторые неисправности, выявленные с помощью системы мониторизации, в частности неисправности грузовиков, могли бы, если бы они вовремя не были обнаружены, привести к значительным поломкам. После получения многообещающих результатов отделом технического обслуживания было проведено обсуждение вопроса расширения программы мониторизации с целью охвата ею других важных с точки зрения производственного процесса машин и установок. Данная программа будет включать помимо всего прочего мониторизацию установок для бурения с отбойкой глубокими скважинами и расширение мониторизации вспомогательного оборудования обогатительных установок.

Рудник

Рудник Квебек Картье в Маунт-Райте расположен в низине Квебек-Лабрадор в Северной Канаде. На нем добывается около 16 миллионов тонн железной руды в год. Рудник в Маунт-Райте представляет собой открытую разработку длиной 6400 м и шириной 1220 м с максимальной глубиной 300 м ниже уровня земли. На руднике, введенном в эксплуатацию в 1976 г., работает 1000 человек.

Процесс добычи

После взрыва электрический экскава-

тор загружает разбитую рудоносную породу в дизель-электрические грузовики, которые доставляют ее на обогатительную установку. Необогащенная руда, поступающая с рудника, имеет низкое качество, так что необходимо ее дробление и обогащение для удаления пустой породы. В двух врачающихся дробилках размер рудоносной породы уменьшается приблизительно до 20 см. После этого руда конвейером подается в бункер, из которого осуществляется ее подача в обогатительную установку. Обо-

гатительная установка состоит из шести дробилок каскадного типа, спиральных сепараторов для разделения руды на концентрат и пустую породу, грохотов и большого числа насосов и конвейеров, с помощью которых руда проходит различные стадии производственного процесса. Руда на выходе обогатительной установки имеет концентрацию железа около 66,5%.

Программа мониторизации механических колебаний

Программа мониторизации механических колебаний была начата в 1980 г. закупкой портативного балансировочного набора 3517 фирмы Брюль и Клер. Этот набор был успешно использован для мониторизации состояния целого ряда машин. Он позволил специалистам по техническому обслуживанию подробно ознакомиться с системой мониторизации механических колебаний и приобрести опыт по регистрации сигналов механических колебаний и определению их значения для каждого типа проверяемой машины.

В частности, набор 3517 был использован для выявления возможной несоосности двигателя и генератора и неправильного монтажа рамы двигателей грузовиков. Набор 3517 был также успешно использован для оценки состояния подвески грузовиков. На экскаваторах набор 3517 был использован для выявления возможной несоосности и разбаланса электродвигателей.

По мере возрастания опыта работы с системой мониторизации увеличивалось число проверяемых машин и воз-

растало доверие к программе мониторизации механических колебаний. Кульминационной точкой была модернизация программы в 1985 г. и расширение системы в систему на базе настольной ЭВМ, способной проводить автоматическое выявление неисправностей на основе записанных на магнитную ленту сигналов. Эта расширенная система эффективна при выявлении и диагностике неисправностей и способна обрабатывать и хранить большие массивы данных.

Система мониторизации на базе ЭВМ

Блок-схема системы мониторизации на базе ЭВМ показана на рис. 1. Система состоит из нескольких акселерометров 4384, двух измерительных магнитофонов 7007, узкополосного частотного анализатора 2033, настольной вычислительной машины и программного обеспечения WT 9114 для последней. При выборочных проверках состояния машинного оборудования может быть использован ручной интегрирующий виброметр 2516.

Регистрация данных механических колебаний

Сигналы механических колебаний, поступающие от соединенных с контролируемым оборудованием акселерометров, записываются на магнитную ленту. По мере надобности для облегчения регистрации были проверяемые машины снабжены приваренными блоками для крепления акселерометров. Это позволило легко проводить измерения в горизонтальном, вертикальном и осевом направлениях с возможностью одновременной записи на магнитофон. Записанные сигналы механических колебаний ана-

лизировались в лаборатории с помощью анализатора 2033, основанного на быстром преобразовании Фурье и работающего под управлением от ЭВМ.

Выявление неисправностей

Каждая машина имеет свою собственную структуру механических колебаний (сигнатуру), о характере которой можно судить по частотным спек-

трам записанных сигналов механических колебаний. Поэтому путем осуществляемых через регулярные интервалы времени измерений и анализа механических колебаний и сравнения «текущих» частотных спектров с опорным спектром «исходного состояния» могут быть обнаружены изменения технического состояния машинного и другого оборудования. На рис. 2 показан пример результатов

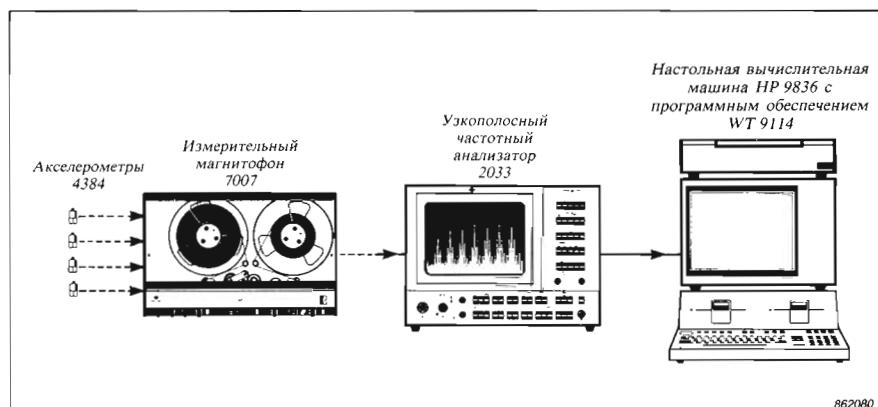


Рис. 1. Принципиальная схема системы мониторизации

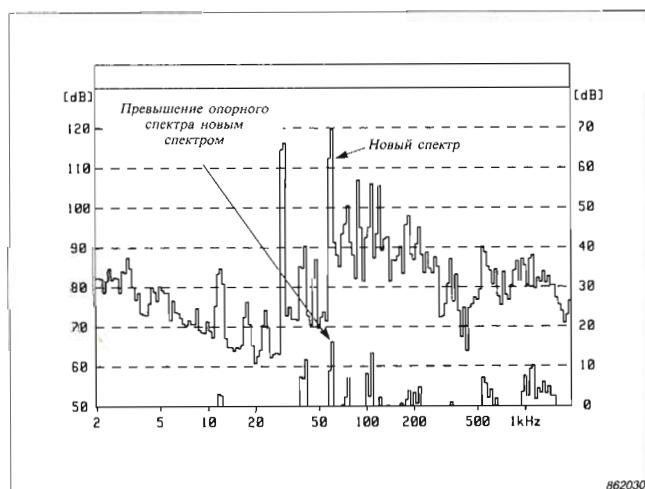


Рис. 2. Пример спектра в логарифмических координатах, используемого для выявления неисправности. Верхняя кривая является текущим спектром механических колебаний. Нижняя кривая показывает частотные составляющие текущего спектра, которые превышают опорный спектр

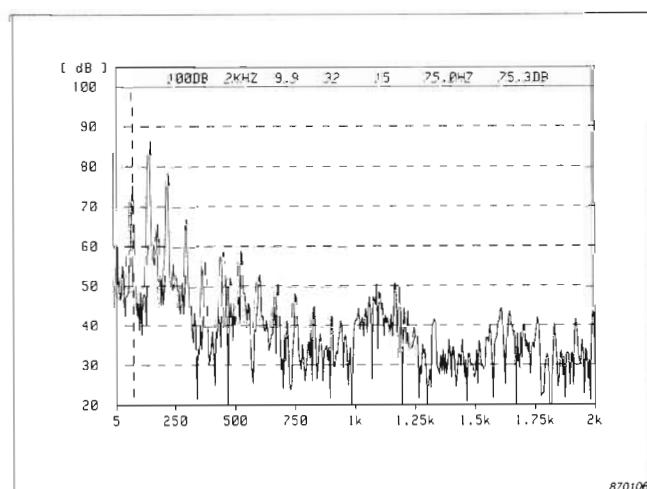


Рис. 3. Пример узкополосного спектра, используемого для диагностики неисправности. Высокая разрешающая способность анализатора позволяет точно идентифицировать отдельные частотные составляющие и соотнести их с рабочим процессом контролируемого машинного оборудования

подобного сравнения спектров механических колебаний. Верхняя кривая представляет собой текущий спектр, а нижняя показывает величину превышения текущим спектром опорного спектра.

Кроме того, описываемая система автоматически компенсирует любые изменения рабочей скорости контролируемого оборудования, которые могут произойти между измерениями и которые в противном случае сделали бы неправомочным сравнение спектров.

Проводящий запись специалист также выполняет сравнение спектров. Для проведения такого сравнения он должен лишь воспроизвести записанный сигнал, подать его на вход анализатора, вызвать соответствующий опорный спектр и задействовать программу сравнения. Система автоматически выдаст сообщение об увеличении амплитуд составляющих механических колебаний.

Специалисты по техническому обслуживанию рудника приобрели значительный опыт как по использованию системы, так и по характеристикам механических колебаний

каждой проверяемой машины. Это позволило им судить о состоянии оборудования по быстрому взгляду на спектр и установить абсолютные предельные значения механических колебаний для каждой отдельной машины.

Высокая разрешающая способность при выявлении неисправностей

Для выявления неисправностей всех типов как высокочастотные, так и низкочастотные составляющие спектров механических колебаний должны быть представлены с идентичным разрешением по частоте. Для обеспечения этого частотные спектры, используеме при сравнении, преобразуются в логарифмические. В логарифмическом масштабе разрешающая способность по частоте равна определенному проценту от соответствующей частоты, так что возможны сравнение спектров и выявление неисправностей в трех декадах частотного диапазона.

Анализ тенденций

При ухудшении состояния машинного оборудования развитие увеличивающейся частотной составляющей (или частотной полосы) может быть

прослежено во времени с помощью графика тенденций. Этим достигается возможность прогнозирования времени, оставшегося до достижения заранее определенного «опасного» уровня. Сомнительные точки графика могут быть исключены из прогноза для получения более точной кривой тенденций.

Для выбора оптимального для анализа тенденций частотного диапазона может быть построен **трехмерный график**. С его помощью можно видеть, как структура роста амплитуд частотных составляющих изменяется во времени.

Диагностика неисправностей

Высокоэффективные возможности системы, предусмотренные для диагностики неисправностей, позволяют точно определить узел или деталь машины, в котором или которой подозревается наличие неисправности. К числу средств для диагностики относятся узкополосный анализ с расширением участков частотного диапазона, возможность определения кепстров, указатели гармоник и боковых полос и др. Пример узкополосного спектра показан на рис. 3.

Мониторизация механических колебаний экскаваторов

Всего в эксплуатации на руднике находятся 13 экскаваторов с электрическим приводом, каждый из которых имеет ковш вместимостью 15 м³. К этим экскаваторам относятся: Bucyrus-Erie 295 B и 195 B1, P&H 2100 BL и Marion 201 M.

В настоящее время коэффициент готовности экскаваторов составляет 65%. Мониторизация механических колебаний сыграла роль в достижении такого высокого значения, так как еще год тому назад коэффициент готовности составлял всего 45%. Основные проблемы были связаны с моторгенераторным агрегатом, который при стоимости замены около 250 000 долларов США и стоимости ремонта 100 000 долларов США представляет собой значительную статью расходов на техническое обслуживание.

Программа мониторизации состояния экскаваторов охватывает следующие позиции:

Моторгенераторный агрегат (МГ) – проблемы, связанные с разбалансом и несоосностью.

Подъемная и поворотная трансмиссии – проблемы с шестернями и подшипниками.

Привод подъемного механизма марки Magnetorque® – проблемы, связанные с разбалансом, подшипниками и эксплуатацией.

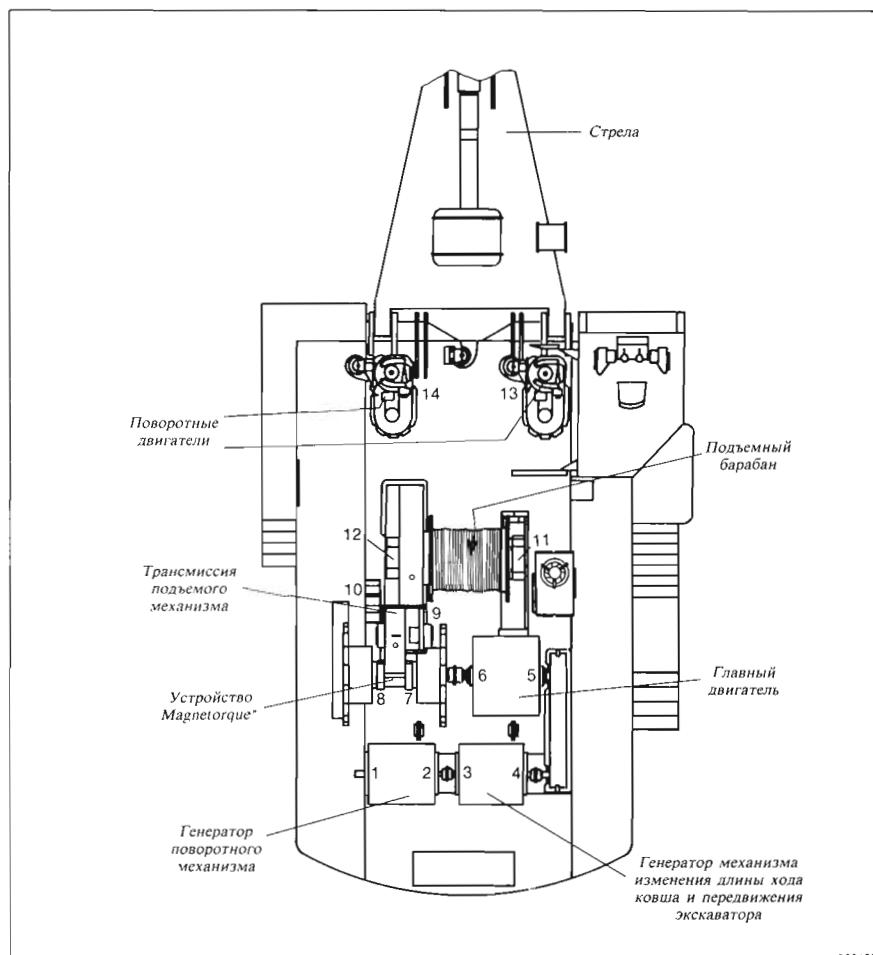


Рис. 4. Вид сверху на экскаватор Р&Н с указанием отдельных агрегатов и точек замера

Программа мониторизации механических колебаний моторгенераторного агрегата

Моторгенераторный агрегат состоит из главного двигателя переменного тока и генераторов постоянного тока для поворотного механизма, подъемного механизма, механизма изменения длины хода ковша и механизма передвижения экскаватора. Проблемы, связанные с разбалансом и с возникшей при монтаже и в процессе эксплуатации несоосностью, встречаются часто и приводят к чрезмерному износу и снижению срока службы моторгенераторных агрегатов.

На рис. 4 и 5 показаны измерительные точки для двух типов моторгенераторного агрегата экскаваторов. Измерения механических колебаний сначала проводятся на новом или прошедшем капитальный ремонт моторгенераторном агрегате до его установки на экскаватор, т.е. во время, когда агрегат находится в отделе технического обслуживания. При этом определяется и регистрируется опорный спектр для проведения последующего сравнения. Сразу же после установки на экскаватор определяется и регистрируется еще один опорный сектор (это делается для проверки монтажа, обычной несоосности и возникающих иногда повреждений при транспортировке). После этого через каждые 1000 или 1200 рабочих часов определяются спектры механических колебаний установленного моторгенераторного агрегата и проводится сравнение с обоими опорными спектрами (хотя в настоящее время этот интервал уменьшен до 600 часов для получения больших массивов данных, необходимых для подробного анализа тенденций).

После сравнения спектров выполняется проверка уровней механических колебаний для выявления частотных составляющих, увеличивающихся по сравнению с опорными спектрами, и при необходимости проводится ремонт. Такая методика была создана

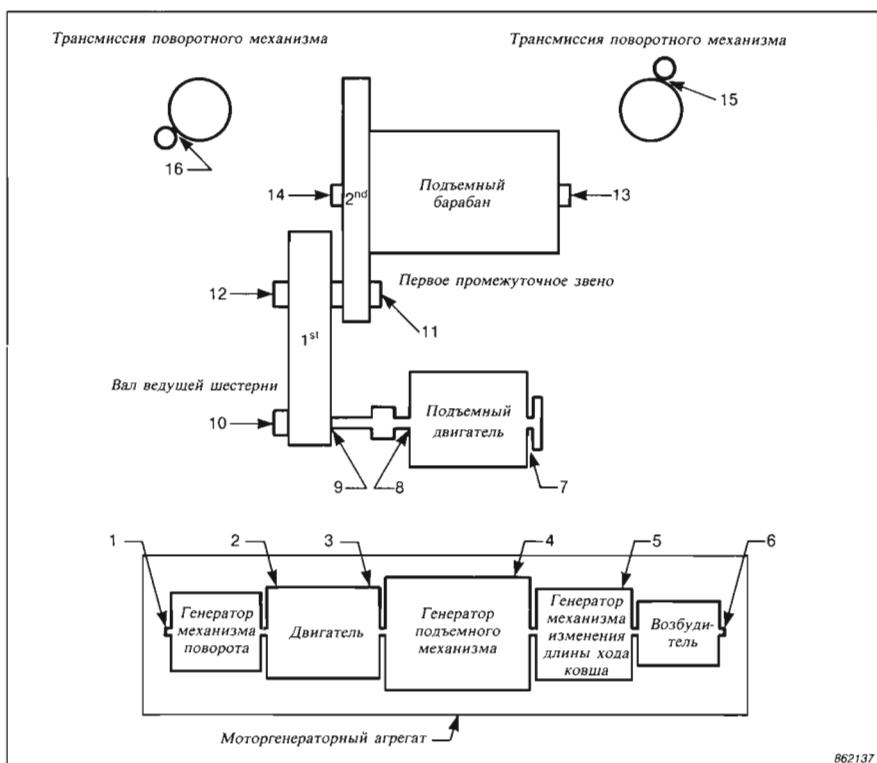


Рис. 5. Схема (вид сверху) экскаваторов Bucyrus-Erie и Marion с указанием отдельных агрегатов и точек замера

на основе опыта контроля состояния экскаваторов, причем увеличение на 20 дБ принято в качестве указателя необходимости немедленного принятия мер. Если неисправность выявлена и соответствующие ей уровни высоки, то неисправность немедленно устраняется. Однако, если неисправность лишь начинает развиваться, она регистрируется и в последующем подвергается усиленному наблюдению.

Примеры выявления неисправностей моторгенераторных агрегатов

Опыт показывает, что **несоосность** деталей моторгенераторного агрегата может быть выявлена по увеличению уровня механических колебаний при удвоенной частоте вращения вала (вторая гармоника).

На рис. 6 показаны примеры спектров, указывающих на несоосность. График слева представляет собой результат сравнения спектров генератора поворотного механизма, указывающий на значительное увеличение (> 30 дБ) уровня второй гармоники, т.е. составляющей с частотой 60 Гц. График справа указывает на увеличение примерно на 16 дБ уровня второй гармоники пускового двигателя, используемого для плавного запуска моторгенераторного агрегата. Двигатель не устанавливается непосредственно на основании моторгенераторного агрегата, а закрепляется на кронштейне. Вследствие сложного монтажа двигателя имеется тенденция к возникновению несоосности.

Разбаланс деталей моторгенераторного агрегата выявляется по увеличению

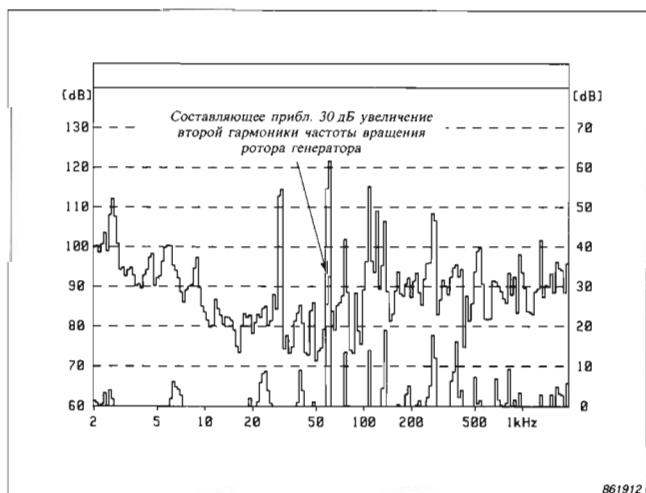
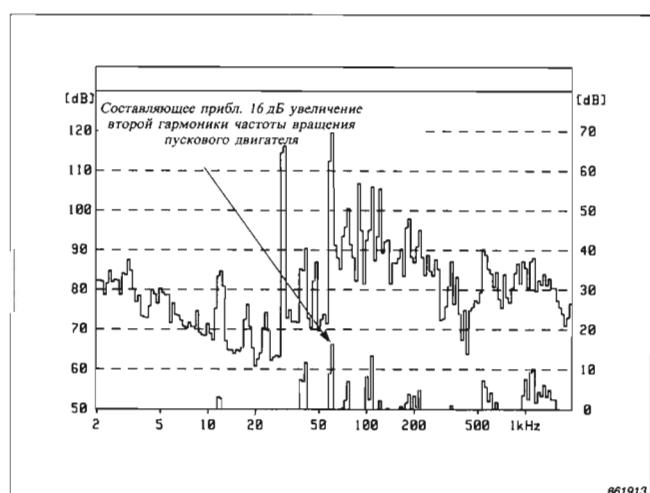


Рис. 6. Пример несоосности, выявленной по сильному росту уровня составляющей механических колебаний с частотой, равной удвоенной частоте вращения



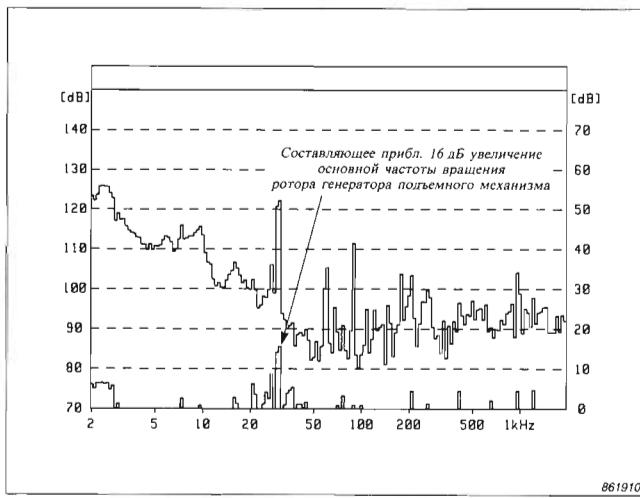


Рис. 7. Пример разбаланса, на который указало сильное увеличение уровня составляющей механических колебаний с соответствующей частоте вращения частотой

уровня механических колебаний при частоте вращения вала. Соответствующий пример иллюстрирует рис. 7, на котором показан результат сравнения спектров механических колебаний генератора подъемного механизма. Здесь видно увеличение на приблизительно 16 дБ при частоте вращения ротора генератора, т.е. 30 Гц.

На рис. 8 показан пример результата сравнения спектров, допустившего выявление неисправности подшипника качения генератора поворотного механизма моторгенераторного агрегата. Проведенные на генераторе поворотного механизма измерения с последующим сравнением спектров показали увеличение составляющих в области высоких частот (см. рис. 8). При инспекции генератора было выявлено, что в подшипнике произошло уплотнение консистентной смазки. Это привело к ухудшению смазки с прямым контактом металлических поверхностей роликов и обойм подшипника. В результате этого контакта произошло возбуждение резонансных частот подшипника, которые находятся в области высоких частот.

В другом случае были выявлены **неполадки электромагнитного характера** главного двигателя (см. рис. 9) моторгенераторного агрегата. После инспекции на двигателе были проведены измерения, в результате которых в частотном спектре была выявлена серия сильных гармоник (частота 10 Гц).

В время испытаний было выявлено, что выключение питания двигателя приводило к немедленному исчезновению этих гармоник. Это указывало на то, что неполадки имеют электрический или электромагнитный характер.

После разборки была проведена инспекция двигателя с измерением зазора между ротором и статором, который был 1,2 мм на одном конце и 0,7 мм на другом. Видимо причина

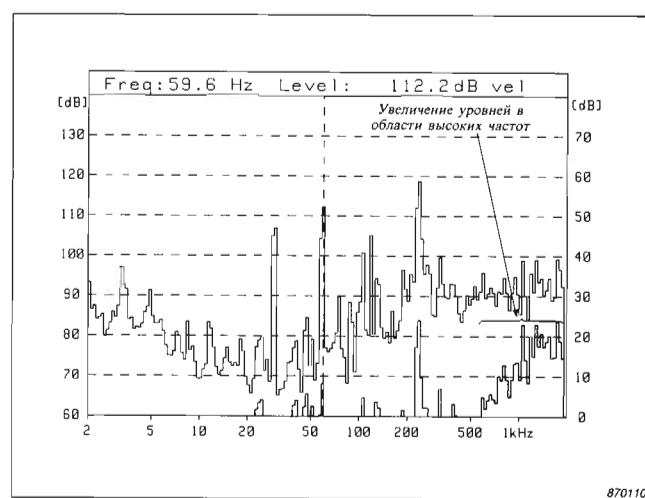


Рис. 8. Пример спектра механических колебаний генератора поворотного механизма. Рост уровней механических колебаний в полосе 500 – 2000 Гц связан с неисправностью подшипника качения

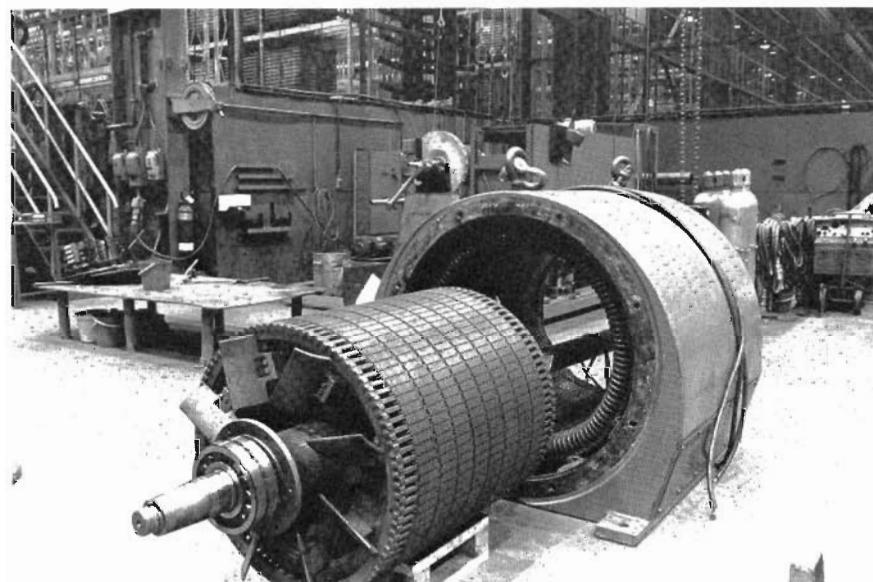


Рис. 9. Главный двигатель моторгенераторного агрегата, у которого была выявлена неисправность электромагнитного характера

этого заключалась в ошибках, допущенных при выставлении зазоров подшипников при первичной сборке. Поэтому механические колебания электромагнитного характера были результатом различия в магнитных полях на концах ротора двигателя. Эти различия были устранены, а измерения были проведены повторно. Упомянутая серия гармоник (10 Гц) исчезла.

Программа мониторизации механических колебаний приводного устройства Magnetorque®

Устройство Magnetorque® обеспечивает привод подъемного механизма и используется в экскаваторах P & H. Оно представляет собой сложную часть оборудования, которое работает по принципу сцепления на вихревых токах. На рис. 10 показана схема привода и трансмиссии подъемного механизма, а на рис. 11 - точки замеров.

Перед началом выполнения программы мониторизации расчетный срок службы устройства Magnetorque® составлял приблизительно 1200 часов. Однако, благодаря использованию системы мониторизации механических колебаний этот срок был увеличен до 6000 часов. С учетом того, что затраты на замену устройства Magnetorque® составляют порядка 100 000 долларов США, а на ремонт - 50 000 долларов, это обеспечило значительную экономию денежных средств.

Основные проблемы, возникающие в устройстве Magnetorque®, связаны с разбалансом, подшипниками, а также с эксплуатационными неполадками. Обычно причиной нарушения равновесия является загрязнение двух вентиляторов очень большого размера, используемых для охлаждения индукторов, расположенных на каждом конце устройства Magnetorque®. Такой разбаланс может приве-

сти к перегреву обмоток индукторов и к возникновению чрезмерных нагрузок на подшипниках. Эксплуатационные неполадки обычно возникают, если оператор слишком часто кладет ковш на породу. Это приводит к значительному росту температуры, что также приводит к увеличению износа.

Так как рабочая скорость устройства Magnetorque® остается постоянной только в течение приблизительно 8 с (во время подъема или опускания ковша), не хватает времени для записи сигналов, необходимых для получения частотных спектров в логарифмическом масштабе для проведения автоматического сравнения спектров. Поэтому проводился узкополосный анализ сигнала с последующим визуальным сравнением спектров. Таким образом можно было изучать отдельные частотные составляющие с помощью эффективных функций анализатора на базе быстрого преобразования Фурье.

На рис. 12 показаны узкополосные спектры механических колебаний двух устройств Magnetorque®. Спектр слева соответствует условиям нормальной работы. Спектр справа указывает на наличие несоосности устройства Magnetorque® и шестерен подъемного механизма. На несоосность четко указывает серия четных гармоник основной частоты приводного двигателя (10 Гц) и серии боковых полос в районе частот, соответствующих зубозазеплению (191,25 Гц) и гармоникам. Интервал между боковыми полосами соответствует частоте вращения приводного двигателя (10 Гц).

Программа мониторизации механических колебаний трансмиссии подъемного и поворотного механизма

В общем случае неполадки, которые могут возникнуть в трансмиссии экскаватора, связаны с износом шестерен, прогрессирующей несоосностью и др. Однако, при мониторизации механических колебаний трансмиссии

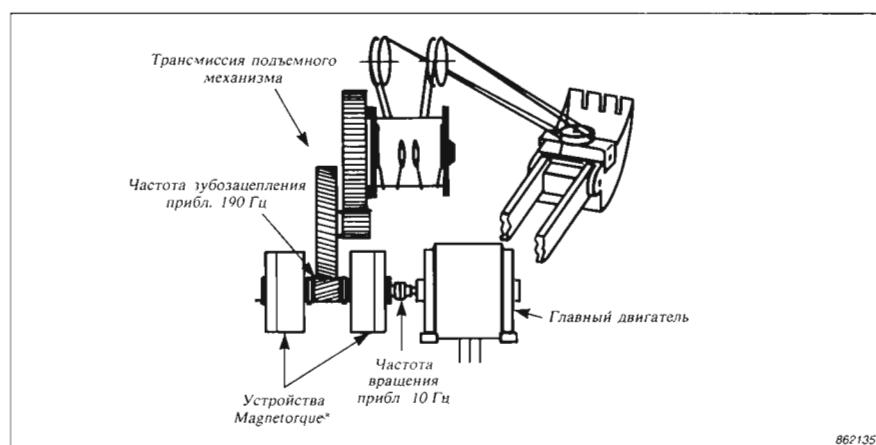


Рис. 10. Схема привода подъемного механизма и трансмиссии



Рис. 11. Магнитная запись механических колебаний трансмиссии привода подъемного механизма. Механические колебания регистрируются в направлениях X, Y и Z

подъемного и поворотного механизма возникают те же трудности, что и при мониторизации механических колебаний устройства Magnetorque®: скорость остается постоянной только в течение нескольких секунд, что является недостаточным для записи сигналов, необходимых для автоматического сравнения спектров.

Измерения были проведены на корпусе редуктора подъемного механизма. Результаты были представлены в виде гистограмм, показывающих уровни механических колебаний с частотами зубозазепления шестерен первого промежуточного звена (380 Гц) и зубчатого венца (34 Гц).

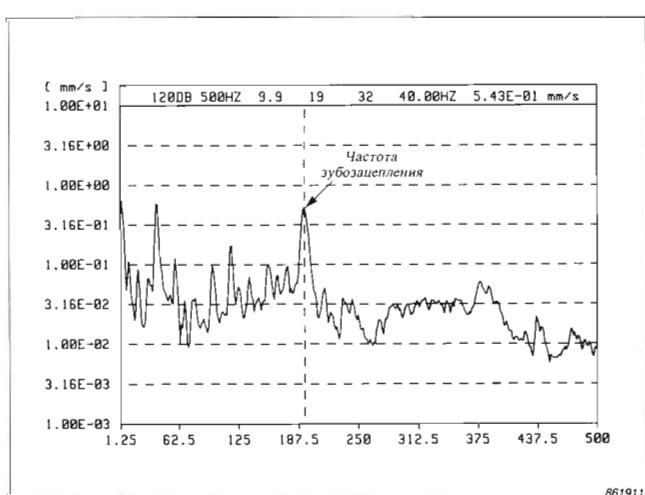
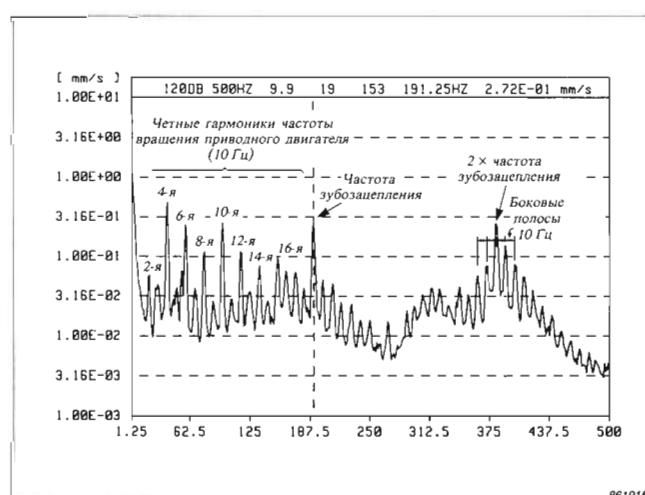


Рис. 12. Узкополосные спектры механических колебаний устройства Magnetorque®. Спектр слева соответствует нормальному состоянию этого устройства, а спектр справа указывает на появление несоосности



Одним из побочных эффектов, возникающих при износе трансмиссии, является передача механических колебаний на весь корпус экскаватора.

Это приводит к повышенному дискомфорту оператора. По этой причине под сиденьем оператора проводятся регулярные проверки механических

колебаний. Измерения повторяются через каждые 200 часов работы экскаватора.

Мониторизация механических колебаний грузовиков

Парк грузовиков рудника состоит из 41 машины Wabco, Terex и Unit Rig, грузоподъемность каждой из которых составляет 170 тонн. Грузовики имеют дизельные двигатели мощностью 1600 л.с., которые осуществляют привод генераторов постоянного тока. Эти генераторы обеспечивают током электродвигатели, расположенные на каждом комплекте задних колес. При стоимости каждого грузовика прибл. 1 миллион долларов США они представляют собой значительное капитальноеложение.

До 1980 года замена дизельных двигателей проводилась через каждые 10000 часов. В настоящее время благодаря внедрению системы мониторизации состояния оборудования время работы было значительно увеличено. Два двигателя проработали более 18000 часов. На рис. 13 показан средний срок службы двигателей грузовиков до их капитального ремонта.

Выявление неисправностей

Ниже перечислены некоторые неисправности, которые были выявлены с помощью системы мониторизации механических колебаний.

Дизельный двигатель/генератор – несоосность двигателя и генератора, отсутствие воспламенения в одном из цилиндров, неисправности подшипников.

Охлаждающий вентилятор – погнутая лопасть, загрязнение лопасти, разбаланс, неправильное натяжение ремня.

Воздуходувка – износ шлицов приводного вала.

Воздуходувка-возбудитель – плохое крепление воздуходувки, нарушение равновесия вследствие загрязнения воздуходувки.

Генератор – разбаланс, несоосность.

Методика технического обслуживания

Через каждые 300 часов работы проводится техническое обслуживание грузовиков, во время которого осуществляется анализ механических колебаний и масла. Сначала грузовики проходят мойку, проводится магнитная запись сигналов механических колебаний и затем масло в двигателе заменяется и анализируется. Если выявляется неисправность, то грузовик или немедленно ремонтируется, или составляется порядок проведения ремонтных работ.

Механические колебания регистрируются в передней и задней частях двигателя, на генераторе и на воздуходувке-возбудителе.

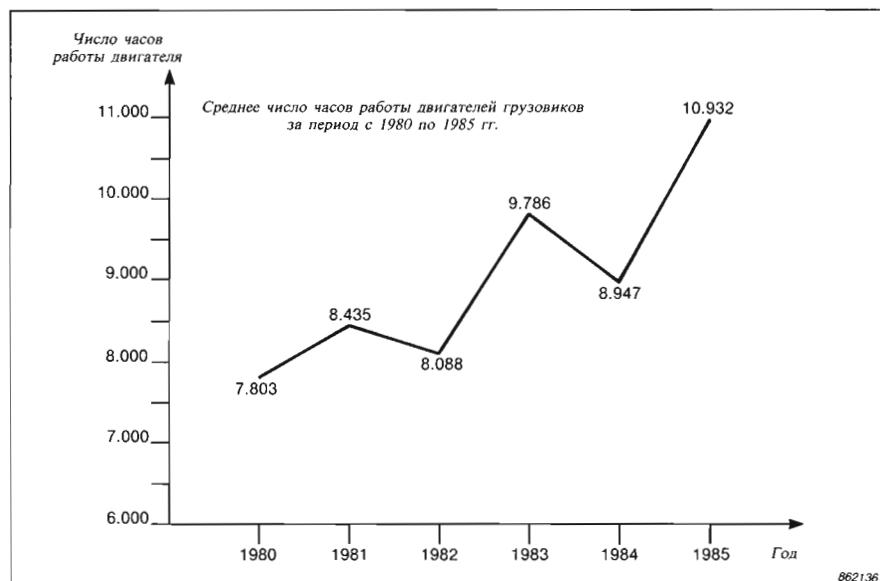


Рис. 13. Средний срок службы двигателей грузовиков

Вентилятор – Terex: (Частота 18 Гц)	Нормальный: -116 дБ Допустимый: 116,1 – 125 дБ Недопустимый: 125,1 – 134 дБ Опасный: 134,1 – дБ
Двигатель – Unit-Rig, Wabco, Terex: (частота 1 × об/мин)	Нормальный: -130 дБ Допустимый: 130,1 – 136,5 дБ Недопустимый: 136,6 – 143 дБ Опасный: 143,1 – дБ
Воздуходувка-возбудитель – Терекс: (частота 1,4722 × об/мин)	Нормальный: -112 дБ Допустимый: 112,1 – 118 дБ Недопустимый: 118,1 – 124 дБ Опасный: 124,1 – дБ
Воздуходувка-возбудитель – Unit-Rig, Wabco: (частота 2 × об/мин)	Нормальный: -115,4 дБ Допустимый: 115,5 – 120,4 дБ Недопустимый: 120,5 – 125,4 дБ Опасный: 125,5 – дБ
Воздуходувка – Unit-Rig, Wabco, Terex: (частота 2,26 × об/мин)	Нормальный: - 96,5 дБ Допустимый: 96,6 – 102 дБ Недопустимый: 102,1 – 108 дБ Опасный: 108,1 – дБ

Для расчета предельных значений была использована следующая вероятностная формула:

$$\text{Нормальный уровень} = \bar{X} - \frac{\sigma}{2} \text{ и ниже}$$

$$\text{Допустимый уровень} = \bar{X} + \frac{\sigma}{2}$$

$$\text{Недопустимый уровень} = \bar{X} + 1,5 \sigma$$

$$\text{Опасный уровень} = \bar{X} + 1,5 \sigma \text{ и выше}$$

Таблица 1. Пример максимально допустимых уровней механических колебаний грузовиков. Приведенные значения являются уровнями механических колебаний в вертикальном направлении спереди дизельного двигателя

Анализ данных

После сравнения спектров механических колебаний техник проводит проверку уровней определенных частотных составляющих, сравнивая их с установленными опорными значениями,

пример которых приведен в таблице 1. Опорные значения, устанавливаемые инженером по техническому обслуживанию, представляют собой максимально допустимые абсолютные уровни механических колебаний.

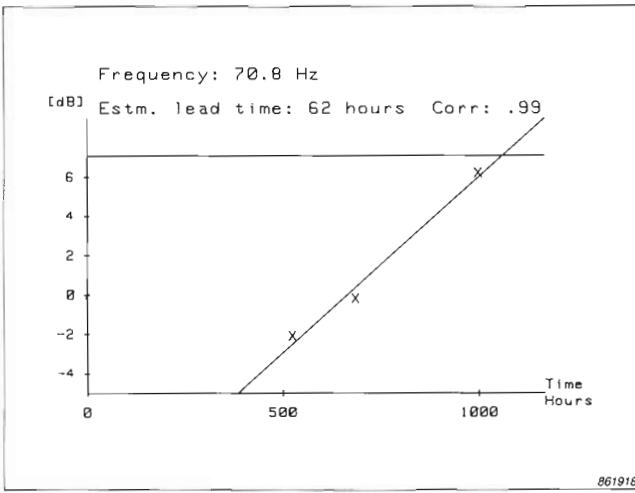
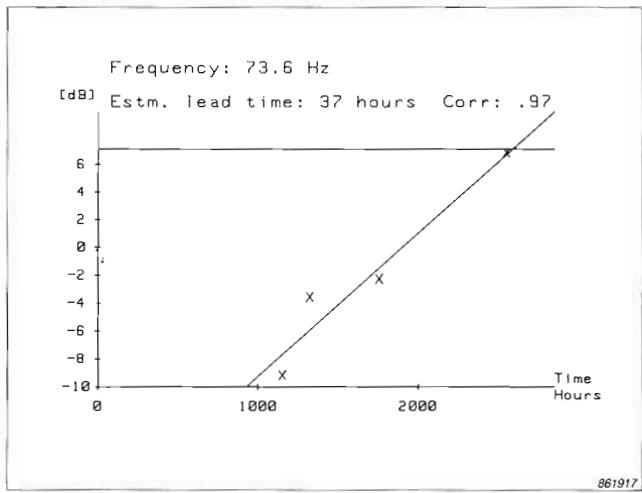


Рис. 14. Графики тенденций, соответствующие частоте вращения приводного вала воздуховодки. Левый график тенденций относится к частоте 73,6 Гц, а правый – к частоте 70,8 Гц

баний. Эти уровни определяются по результатам статистического анализа уровней механических колебаний грузовиков.

Приводной вал воздуховодки

Серьезные проблемы были связаны с приводным валом воздуховодки. Несколько двигателей вышли из строя в результате износа шлицов, расположенных в приводных втулках. Этот вал приводит в действие регулятор двигателя и в случае остановки вала двигатель развивает слишком большую скорость и может разрушиться. Стоимость замены лежит в районе 160 000 долларов США и поэтому выход из строя не может быть допущен.

Проблема впервые возникла после проведения модификации двигателя. После этой модификации появился побочный эффект, который заключался в том, что привод воздуховодки постоянно нагружался и разгружался. Это приводило в конечном счете к износу шлицов на концах приводного вала. В этот момент срок службы воздуховодки вследствие серьезности проблемы был уменьшен до 5000 часов. Поэтому было принято решение исследовать эту проблему с помощью системы мониторизации механических колебаний. Это решение было успешным и срок службы воздуховодки был увеличен до 15 000 часов. Изготовитель двигателей был соответствующим образом проинформирован и конструкция была соответственно изменена.

Мониторизация была осуществлена с помощью сравнения спектров и анализа тенденций. Проблему можно охарактеризовать как увеличение составляющей механических колебаний с частотой, соответствующей частоте вращения приводного вала воздуховодки. На рис. 14 показаны графики тенденций, соответствующие этой частоте вращения. Частота вращения приводного вала воздуховодки составляла 73,6 Гц или 70,8 Гц в зависи-

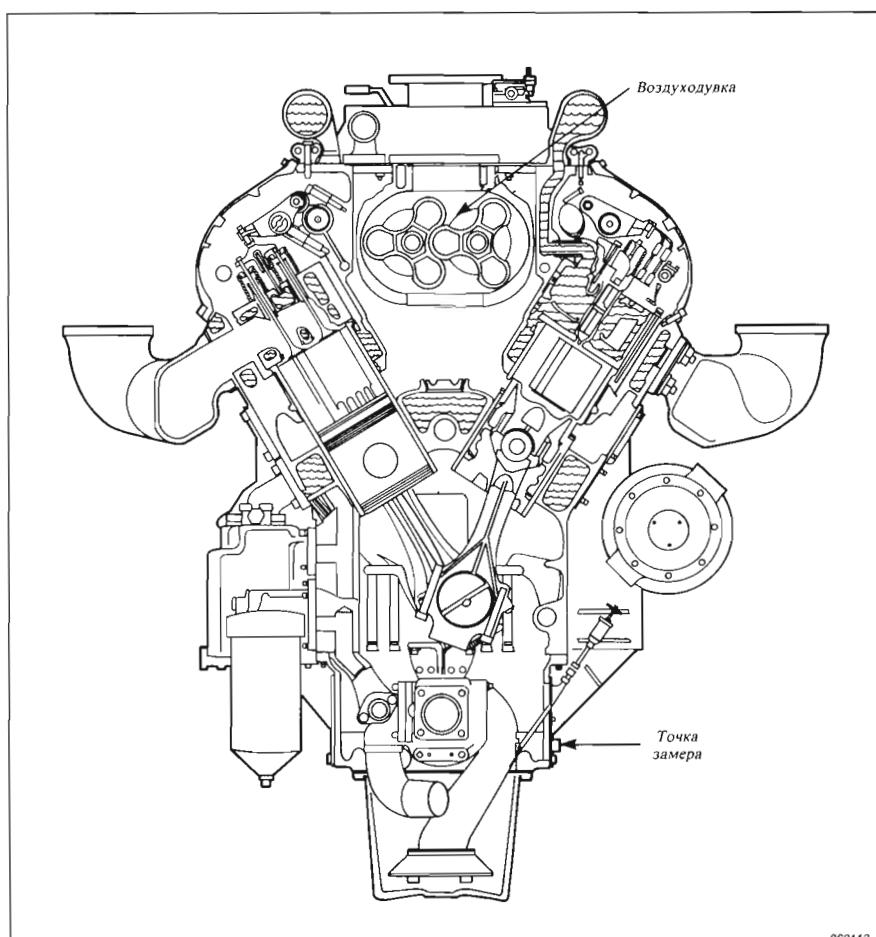


Рис. 15. Точка мониторизации механических колебаний дизельного двигателя, осуществляемой с целью выявления неполадок воздуховодки



Рис. 16. Приводной вал воздуховодки с поврежденными шлицами

мости от частоты вращения двигателя при испытаниях. Показанные на графиках верхние пределы соответствуют максимальному увеличению уровня механических колебаний, допустимому до ремонта. На рис. 15 приведена схема двигателя с указанием расположения воздуховодки и измерительной точки, использовавшейся при мониторизации с целью выявления неисправности. На рис. 16 показан приводной вал воздуховодки.

Описанная неисправность была выявлена на четырех грузовиках. В каждом случае в результате этого были заменены приводной вал и втулки. Затраты на замену составили прибл. 1% от стоимости капитального ремонта всего двигателя, что обеспечило общую экономию прибл. в 630000 долларов США.

Вентилятор

На рис. 17 показан результат сравнения спектров механических колеба-

ний, указывающий на начало развития неисправности при частоте вращения вентилятора (17,8 Гц). Соответствующий график тенденций показан на рис. 18. Показанный на графике верхний предел соответствует максимально допустимому увеличению уровня механических колебаний. Была проведена соответствующая балансировка вентилятора и уровень механических колебаний снизился до нормального.

Воздуховодка-возбудитель

Комплект воздуховодки-возбудителя, установленный на дизельном двигателе, осуществляет подачу охлаждающего воздуха для генератора и тока возбуждения для индуктора генератора.

Подаваемый в вентилятор воздух не фильтруется и частой проблемой является его загрязненность, что приводит к нарушению равновесия воздуховодки. В показанном на рис.

19 примере опасные уровни механических колебаний были зарегистрированы на упомянутом комплекте. Воздуховодка была демонтирована и очищена, после чего уровень механических колебаний заметно уменьшился.

Общее состояние двигателя

Приведенный на рис. 20 график тенденций дает интересную информацию. График указывает на тенденцию постоянного роста уровня механических колебаний при частоте вращения коленчатого вала. Такая кривая тенденций совместно с другими данными о состоянии двигателя может быть эффективно использована как показатель общего износа двигателя. Как только уровень механических колебаний достигает опасного предела, можно планировать проведение капитального ремонта.

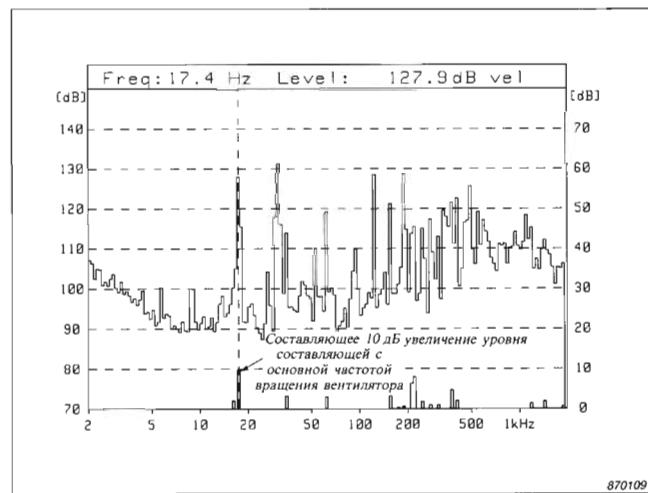


Рис. 17. Результат сравнения спектров, указывающий на неисправность вентилятора

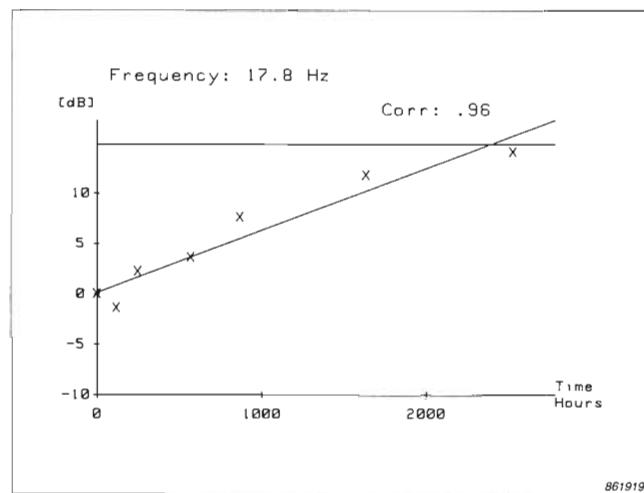


Рис. 18. График тенденций, соответствующий частоте вращения вентилятора. Из этого графика четко видна серьезность неисправности вентилятора

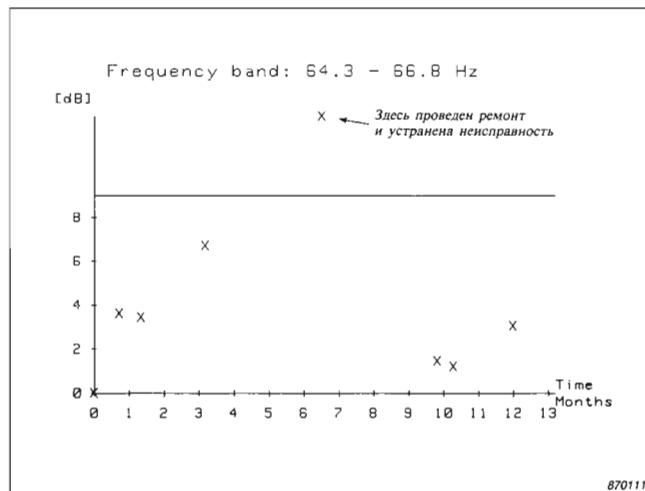


Рис. 19. График тенденций, соответствующий частоте вращения воздуховодки-возбудителя. Уровень механических колебаний возрастает до опасного уровня и затем падает после проведения ремонта

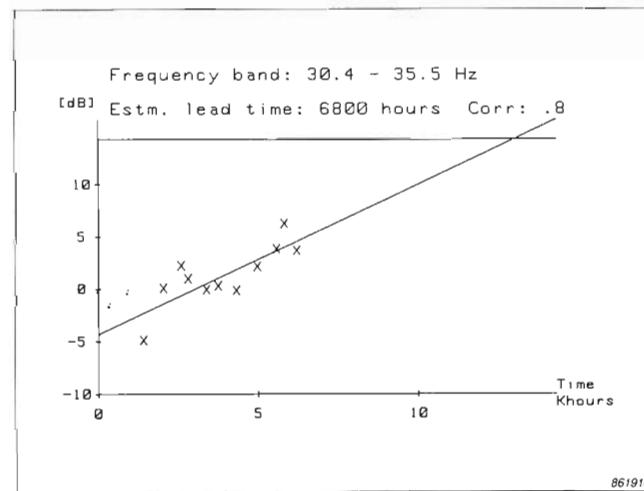


Рис. 20. График тенденций, соответствующий частоте вращения коленчатого вала

Мониторизация механических колебаний обогатительной установки

Обогатительная установка рудника в Маунт-Райте, являющаяся одной из самых крупных в мире, способна перерабатывать 135 000 тонн сырой руды в сутки. Обогатительная установка имеет шесть параллельных контуров, в состав которых входит оборудование для дробления и обогащения. Программа мониторизации механических колебаний охватывала шесть дробилок, привод ленточного конвейера и несколько сотен насосов.

Дробилки

Дробилки каскадного типа диаметром 9,75 м приводятся в действие двумя двигателями мощностью 3000 л.с., соединенными с редукторами (см. рис. 21). Вследствие их важности для работы обогатительной установки дробилки имеют первоочередной приоритет на установке. Механические колебания замерялись с интервалами в одну неделю в 16 точках привода.

Основные проблемы связаны с несоосностью узлов установки, неисправностями подшипников и неполадками системы передачи. Иногда возникала другая проблема вследствие поломки установочных штифтов, фиксирующих опорный блок подшипников. Это приводило к несоосности ведущей шестерни и зубчатого венца дробилки.

На рис. 22 и 23 показаны примеры узкополосных спектров механических колебаний редуктора дробилки. На рис. 22 можно ясно различить составляющую с частотой зубозазцепления ведущей шестерни и зубчатого венца дробилки, а также серию гармоник. На рис. 23 показан расширенный узкополосный спектр в районе основной частоты зубозазцепления, в котором видна серия боковых полос с интервалом 3 Гц, что соответствует частоте вращения ведущей шестерни. На первый взгляд можно подумать,

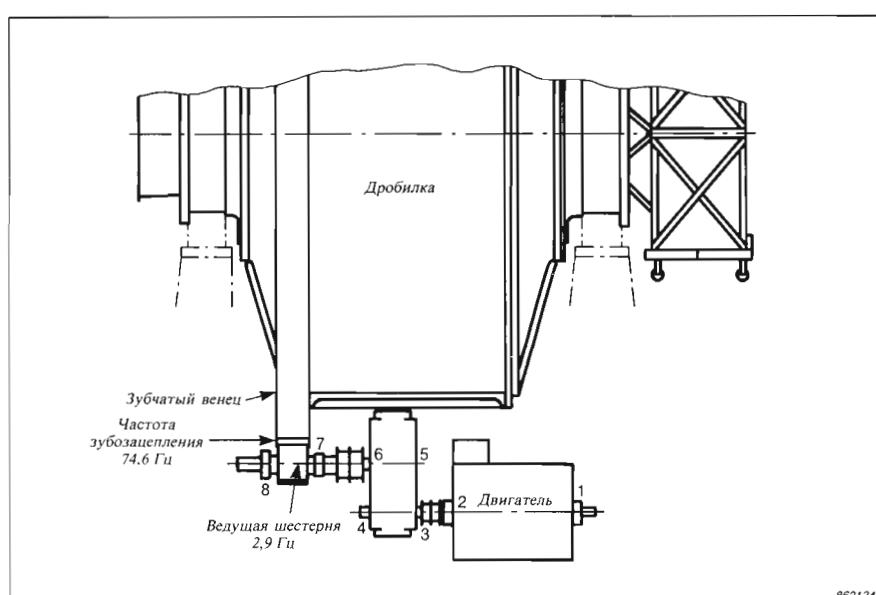


Рис. 21. Точки замера на приводе дробилки

что причина заключается в несоосности. Однако, после тщательного изучения спектров механических колебаний было определено, что причина появления пиков в этих спектрах заключается в разном характере износа ведущей шестерни и зубчатого венца дробилки, а также, возможно, в небольшом эксцентричестве ведущей шестерни. Ведущая шестерня была относительно новой, а зубчатый венец дробилки довольно долго не заменялся.

Системы насосов и приводной узел главного конвейера

Так как процесс обогащения руды ведется во влажном состоянии, на установке используется большое число насосов. В состав систем насосов входят следующие агрегаты: специальные насосы для хвостов обогащения, перекачивающие содержащие тонкие аб-

разивные примеси жидкости, вертикальные насосы для технологической воды с непосредственным приводом, вакуумные насосы для фильтрационных столов и насосы дробилки для удаления поверхностного слоя, сортирования и рециркуляции.

Насосы для хвостов обогащения проверяются каждые 3 месяца. Механические колебания каждой системы насосов измеряются и анализируются через каждые 6 недель (в неделю проводятся измерения на одной системе). Мониторизация механических колебаний вакуумных насосов фильтрационных столов происходит с двухмесячным периодом.

К типичным неисправностям, выявленным с помощью системы мониторизации, относятся: неполадки подшипников и зубчатых передач, несоосность и др. У насосов для хвостов

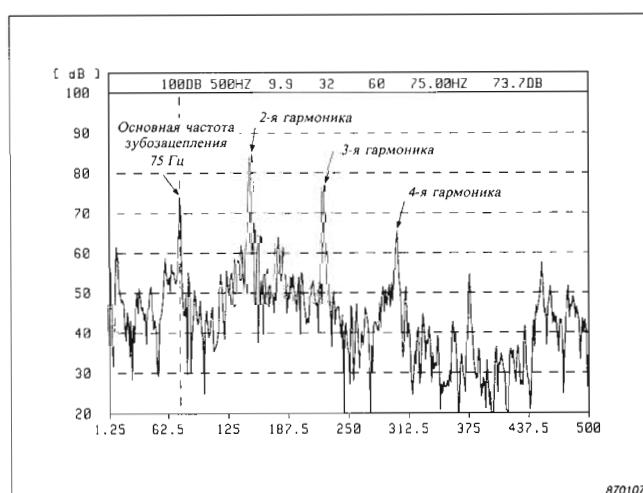
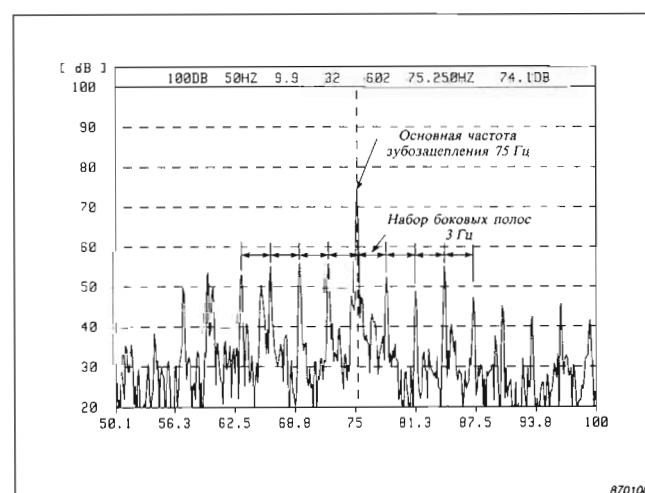


Рис. 22. Узкополосный спектр механических колебаний редуктора дробилки, содержащий серию гармоник частоты зубозазцепления ведущей шестерни и зубчатого венца дробилки



обогащения, которые имеют жидкостной привод, часто возникали проблемы с подшипниками на стойках вследствие несоосности двигателя, насоса и жидкостного привода.

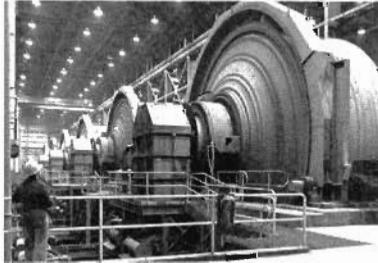
Мониторизация механических колебаний конвейера осуществлялась с относительно большими интервалами в связи с нехваткой персонала. Типичными проблемами были несоосность и неисправности подшипников и зубчатых передач.

Предлагаемая программа мониторизации

Вследствие большого числа точек замера (несколько тысяч) два специалиста не в состоянии проводить запись на ленту с регулярными, короткими интервалами времени. Поэтому в настоящее время решено применять интегрирующий виброметр 2516 при быстрых и периодических проверках состояния насосов и приводов конвейеров. Такие проверки обеспечат защиту от внезапного

ухудшения состояния. Анализ записанных сигналов механических колебаний может быть проведен с интервалами, возможными при современном наличии персонала, или когда прибор 2516 отметит увеличение широкополосного уровня механических колебаний.

Заключение



Экскаваторы, грузовики и дробилки представляют собой жизненно важное оборудование при добыче железной руды. Материал, изложенный в данной брошюре, ясно показывает, что мониторизация механических колебаний представляет собой эффективный инструмент для специалистов по техническому обслуживанию рудника.

Такие результаты, как «предотвращен выход из строя 4 грузовиков», «средний срок службы двигателей грузовиков увеличен с 7800 часов до 10900 часов», «коэффициент готовности экскаваторов увеличен с 45% до 65%», «срок службы устройств Magnetorque® увеличен с 1200 часов до 6000 часов» и т.п., свидетельствуют о том, что капитальные затраты на систему мониторизации окупились много раз.

Начав с ограниченной программы мониторизации механических колебаний, которая была затем расширена с учетом применения системы на базе настольной ЭВМ, специалисты по техническому обслуживанию смогли приобрести огромный опыт по проверяемому машинному оборудованию. Это позволило им разработать эффективную методику мониторизации и дало возможность техникам быстро выносить решения о техническом состоянии оборудования по результатам сравнения с допустимыми пределами механических колебаний, установленными для отдельных агрегатов, узлов и деталей.

Авторы выражают свою признательность специалистам отдела технического обслуживания рудника в Маунт-Райте за их помощь при подготовке данной брошюры.

Благодарность авторов заслуживают именно:

Гай Френч, инженер-механик

– анализ механических колебаний грузовиков

Ренальд Филлион, инженер-механик

– анализ механических колебаний экскаваторов

Майкл Башар, инженер-исследователь

– анализ механических колебаний экскаваторов и устройств Magnetorque®

Рене Бодро, инженер-технолог

– анализ механических колебаний обогатительной установки.

Брюль и Кьер 

Московский центр фирмы Брюль и Кьер

Ленинский проспект, 65 · 117017 Москва · Телефон: 135-86-16 · Телекс: 411637 nafta su · Телефакс: 135-85-96

Запросы на каталоги, проспекты и инструкции по эксплуатации на русском языке просим направлять по адресу:
Москва, К-31, Кузнецкий мост 12, Отдел промышленных каталогов ГПНТБ СССР, тел.: 220-78-51