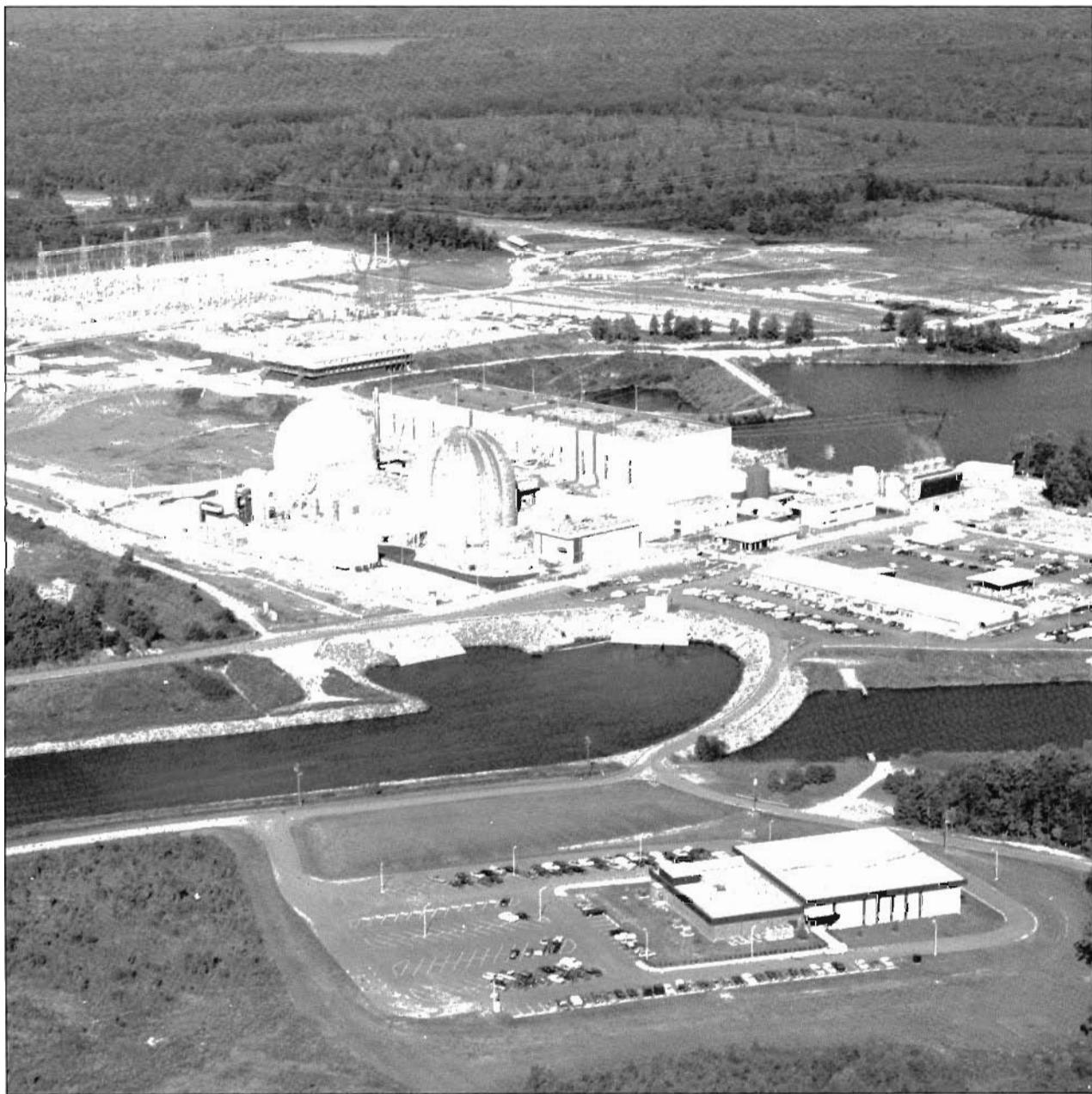




Мониторизация состояния машинного оборудования путем анализа механических колебаний

**Опыт применения мониторизации на
атомной электростанции**



Мониторизация состояния машинного оборудования путем анализа механических колебаний

Опыт применения мониторизации на атомной электростанции

Д. Н. Браун
Брюль и Къер

Аэроснимок на передней странице обложки показывает атомную электростанцию Норт Ана фирмы Вирджиния Паур в центральной части Вирджинии, США. Эта атомная электростанция имеет две установки на реакторах нагнетаемой воды. Ее общая выходная мощность 1786 МВт служит для энергоснабжения области с населением прибл. 4 000 000 человек.

Все фотографии в данной брошюре, автором которых является Томас Келси, предусмотрены и опубликованы по соглашению с атомной электростанцией Норт Ана.

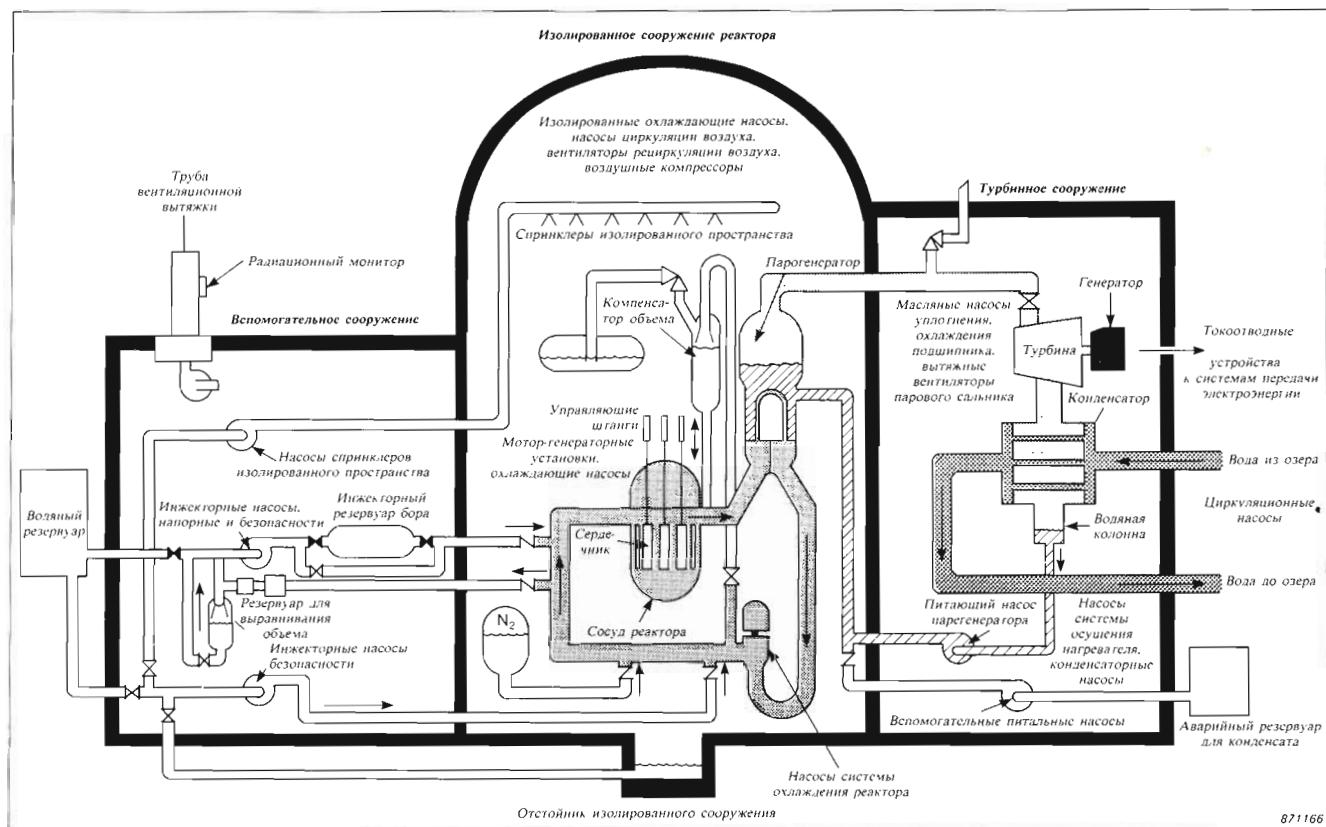


Рис. 1. План одной из двух ядерных электрогенерирующих установок атомной электростанции Норт Ана

Введение

Неисправности машин с вращающимися элементами являются основной причиной вынужденных простоев в работе силовых установок или уменьшения их выходной мощности. Стоимость простоя реактора вместе с жесткими требованиями безопасности делает содержание надежного состояния и контроль этого состояния всего машинного оборудования жизненно важной необходимостью для обеспечения бесперебойной эксплуатации реактора и исключения внезапных отказов оборудования.

Применение программы профилактического техобслуживания, например, основанной на мониторизации механических колебаний программы, позволяет определить с большой эффективностью состояние основных машин с вращающимися элементами. Системы мониторизации способны выдавать предупредительную информацию на самых ранних стадиях возникновения потенциальных неисправностей, позволяют определить их причину и могут использоваться для составления планов техобслуживания и графиков ремонта. Следовательно, такие системы могут предупредить

аварию с катастрофическими последствиями, уменьшить вынужденные перерывы в работе, способствовать максимальной утилизации имеющихся мощностей, увеличить срок службы установки и уменьшить стоимость затрат по техобслуживанию.

В данной брошюре описывается программа и аппаратура, используемые в процессе мониторизации механических колебаний основных машин с вращающимися элементами на атомной электростанции Норт Ана фирмы Вирджиния Паур в США. Целый ряд неисправностей машинного оборудования был обнаружен благодаря используемой системе. Соответствующие примеры описываются ниже. Многие из таких неисправностей могли вызвать аварию, перебои в работе реактора или по меньшей мере уменьшение выходной мощности, если бы по причине отсутствия информации о состоянии механизмов повреждениям была дана возможность дальнейшего развития.

Атомная электростанция Норт Ана
Атомная электростанция Норт Ана состоит из двух отдельных установок

на реакторах нагнетаемой воды, каждая из которых приводит паровую турбину мощностью 970 МВт. Несущая номер 1 установка была запущена в промышленную эксплуатацию в июне 1978 г., а установка номер 2 - в декабре 1980 г.

На рис. 1 показан план одного из реакторов электростанции и энергетических установок с указанием опорного машинного оборудования, состояния которого подвергается непрерывной мониторизации (перечень подвергаемого мониторизации оборудования приведен на последней странице). Реактор, парогенератор и мощные насосы, перекачивающие воду между ними, установлены в отдельном изолированном сооружении. Это строение высотой 61 м, с куполом, изготовлено из армированного бетона и имеет стальную обшивку. Пар, через систему трубопроводов, подается в смежное здание, в котором расположена турбина, генератор и система нагнетания и охлаждения конденсата. Дополнительное здание содержит часть системы аварийного охлаждения реактора и вспомогательные системы нагнетания и охлаждения.

Система мониторизации состояния машинного оборудования

Система фирмы Брюль и Клер, установленная на атомной электростанции Норт Ана и обеспечивающая мониторизацию машинного оборудования последней, показана на рис. 2.

Система базируется на принципе измерения и анализа отображающих механические колебания машинного оборудования сигналов и в ее работе учитываются два уровня.

Уровень 1. Еженедельный выборочный контроль
Один раз в неделю с помощью интегрирующего виброметра 2516 фирмы Брюль и Клер производится контроль

состояния подлежащего мониторизации машинного оборудования. Виброметр 2516 представляет собой малогабаритный портативный прибор с автономным питанием для измерения ускорения и скорости механических колебаний в широкой частотной полосе и эквивалентных уровнях механических колебаний. Прибор 2516 выдает одиночесленные показатели, характеризующие состояние машинного оборудования, и способен показать наличие, если они имеются, каких-либо значительных изменений состояния этого оборудования, возникших с момента последнего снятия показаний.

Еженедельный контроль дает обзорную картину общего состояния машинного оборудования и выделяет машины, требующие более подробного анализа механических колебаний для диагностики имеющихся неполадок или дефектов.

Уровень 2. Ежемесячный анализ состояния машинного оборудования

Один раз в месяц или по усмотрению при наличии выявленного при еженедельном контроле дефектов система используется для выполнения расширенного анализа механических колебаний для получения подробной картины состояния машины путем изучения частотных спектров механических колебаний. Эта процедура дает предельно раннюю предупредительную информацию и позволяет диагностировать причину дефекта. Для

выполнения данного анализа состояния машины имеются две системы:

1. Лабораторная система на базе ЭВМ показана на рис. 3. Отображающие механические колебания контролируемого оборудования сигналы записываются на ленту измерительного магнитофона 7007 для последующего анализа. В лаборатории эти сигналы анализируются с помощью узкополосного частотного анализатора 2033, управляемого от настольной ЭВМ с программным обеспечением для мониторизации состояния машинного оборудования WT 9114. Такая система осуществляет автоматическое сравнение спектров, построение трехмерных графиков, анализ тенденций и диагностику неисправностей. Данная система в общих случаях используется для проведения ежемесячного анализа.
2. Портативная система, используемая для поиска неисправностей, показана на рис. 4. В этой системе виброанализатор 2515 используется для проведения анализа состояния машинного оборудования непосредственно на месте его эксплуатации. Виброанализатор 2515 представляет собой портативный батарейный прибор, способный обнаружить неисправности и дефекты путем сравнения спектров и диагностировать причину этих неисправностей и дефектов путем

анализа в узких полосах частот, расширения спектра, кепстрально-го анализа и др. Система может сопрягаться с базовой ЭВМ для хранения больших массивов информации, последующей ее обработки и т.п.

Определение и диагностика неисправностей и дефектов

Неисправности и дефекты машинного оборудования сопровождаются изменениями формы частотных спектров создаваемых этим оборудованием механических колебаний. Наличие дефекта можно определить сравнением двух частотных спектров, зарегистрированных в различное время. Причину неисправности или дефекта можно диагностировать путем определения увеличившихся частотных составляющих и соотнесения таких составляющих с узлами учитываемого машинного оборудования. Для максимального использования возможностей системы, применяются два различных типа частотных спектров с целью определения и диагностики дефектов.

С целью отыскания дефекта используются спектры с полосами с постоянной относительной (процентной) шириной, способствующие быстрой предварительной обработке данных и применению перекрывающего три декады диапазона частот с достаточной разрешающей способностью для определения всех видов дефектов.

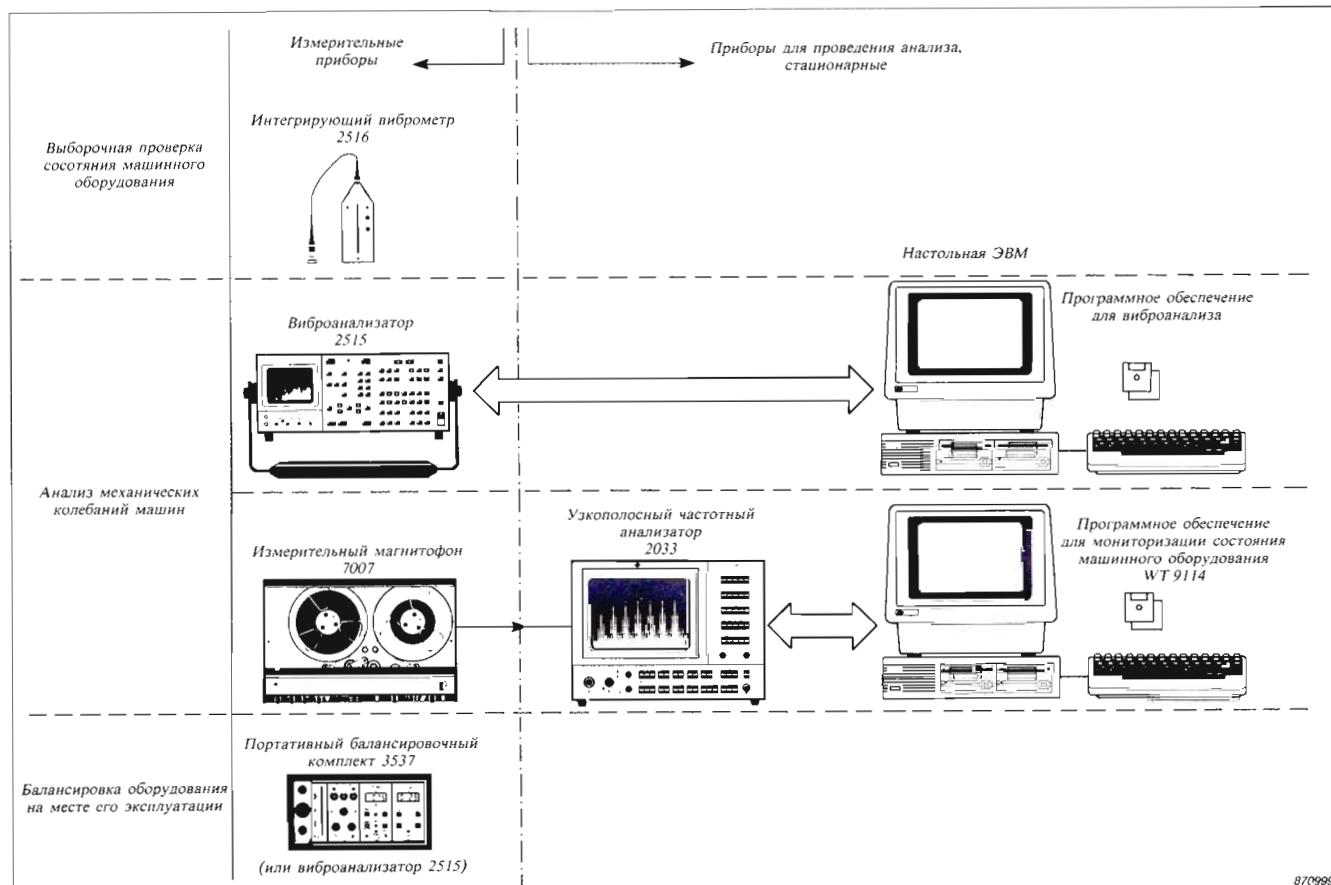


Рис. 2. Аппаратура, используемая в осуществляющей контроль механических колебаний системе мониторизации состояния машинного оборудования



Рис. 3. Лабораторная аппаратура, используемая при проводимом ежемесячно подробном анализе машин, оборудованных мониторизацией

Примеры таких спектров показаны на рис. 10, 11, 12 и 14.

При диагностировании дефектов используются получаемые путем быстрого преобразования Фурье узкополосные спектры, способствующие эффективному выявлению всех составляющих анализируемого механических колебаний. Примеры узкополосных спектров показаны на рис. 8, 9, 16 и 17.

Анализ тенденций

При обнаружении дефекта и диагностировании его причины, необходимо определить срок времени, по истечении которого дефект перерастет в поломку, с тем, чтобы запланировать техобслуживание или ремонт еще до выхода оборудования из строя. Это осуществляется путем анализа тенденций, на основе которого составляются графики изменений амплитуд механических колебаний на определенных частотах или в определенных диапазонах частот и оценивается длина отрезка времени до вероятного достижения установленного критиче-

ского предела. Примеры результатов такого анализа тенденций показаны на рис. 13 и 15.

Балансировка роторов

При осуществляющейся по мере необходимости повторной балансировке роторов используется вибранализатор 2515 или портативный балансировочный комплект 3537 фирмы Брюль и Клер. Комплект 3537 (см. рис. 6) является специализированным набором для балансирования, снабженным узкополосным сопровождающим фильтром для балансирования при работе оборудования при неустойчивых скоростях. Вибранализатор 2515 и комплект 3537 измеряют как амплитуду вызванных разбалансов механических колебаний, так и величину фазового угла относительно опорной точки (метки). Результаты обрабатываются с помощью карманного калькулятора, использующего программное обеспечение WW 9021 и вычисляющего величину массы и ее положение, необходимые в процессе балансировки.



Рис. 4. Вибранализатор 2515, используемый для отыскания несправностей, показан во время анализа механических колебаний насоса системы осушения нагревателя

Мониторизация в изолированном сооружении

Во время остановки реактора специалисты имеют возможность доступа в помещение реактора, в котором с помощью вибранализатора 2515 они осуществляют контроль состояния вентиляторов, охлаждающих механизмы привода управляющих стержней, а также различных насосов и других механизмов реактора. Мониторизация в изолированном сооружении сопряжена с рядом проблем, связанных с опасностью радиоактивного облучения операторов и заражения используемой ими аппаратуры. Вибранализатор 2515 является идеальным для использования в подобных средах, поскольку он:

1. является портативным и работает от внутреннего батарейного источника питания
2. обеспечивает быстроту в обращении, необходимую при наличии ограниченного времени нахождения в помещении в связи с опасностью облучения



Рис. 5. Запись сигналов, отображающих механические колебания насоса питающей воды парогенератора



Рис. 6. Применение портативного балансировочного комплекта 3537 при балансировке вентилятора парового сальника

- выдает непосредственно на месте информацию о состоянии оборудования и диагностирует любой дефект
- имеет уплотненный корпус и может подвергаться чистке для удаления контаминирующих частиц. Кроме того, специалист при рабо-

те может использовать прозрачный пластиковый мешок, который просто удаляется при выходе из изолированного сооружения

- не мешает при работе в труднодоступных местах, что является большим преимуществом, поскольку работы в изолированном

сооружении зачастую проводятся в тесных пространствах

- не имеет внутренних вентиляторов, так что исключена возможность засасывания в него зараженной пыли.

Программа мониторизации машинного оборудования

Программа мониторизации охватывает в общей сложности 98 машин (список приведен на последней странице), выбранных для мониторизации с учетом следующей классификации:

- опорное производственное машинное оборудование, не имеющее дублирующих машин, например, турбины и генераторы
- опорное производственное машинное оборудование, имеющее дублирующие машины, например, парогенератор, питающие водяные насосы, циркуляционные насосы и др.
- машинное оборудование, которое не является опорным в производственном цикле, но имеющее важное значение в связи с другими факторами, например, аварийные дизельные агрегаты, насосы мокрого тушения и др.
- машинное оборудование, обуславливающее затруднения.

Измерение механических колебаний
Отбор отображающих механические колебания сигналов производится с помощью акселерометров, устанавливаемых на машине в заранее определенных точках. Крепежные приспособления встроены в оборудованные под мониторизацию машины для обеспечения удобства крепления акселерометров и выполнения многократных измерений. Выход акселерометров может быть непосредственно соединен с интегрирующим виброметром 2516, виброанализатором 2515, измерительным магнитофоном 7007 и/или портативным балансировочным комплектом 3537.

Составление маршрутов проведения измерений и контроль за сбором информации организованы по программе хранения основных данных на базе персональной ЭВМ.

Еженедельный профилактический контроль

Один раз в неделю виброметр 2516 используется для измерения общего уровня механических колебаний каждой из 98 машин, подлежащих мониторизации. Процедура сбора данных занимает прибл. 2,5 ч. Сбор данных ограничен проведением однократного снятия уровня механических колебаний каждой машины в точке

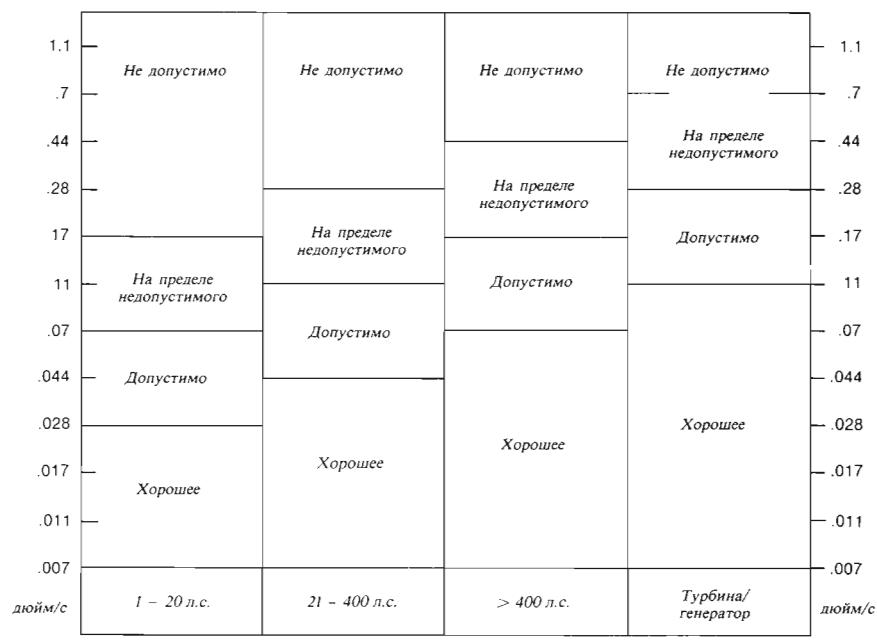


Рис. 7. Пример таблицы интенсивности механических колебаний, используемой при оценке состояния машинного оборудования

наибольшей амплитуды механических колебаний, зарегистрированной на данной машине во время предыдущего обширного контроля и анализа.

Оценка интенсивности механических колебаний

Для определения степени опасности механических колебаний и создания представления о состоянии машинного оборудования, специалисты пользуются относящимися к интенсивности механических колебаний стандартами. В этих стандартах предполагаются измерения механических колебаний в диапазоне частоты от 10 Гц до 1 кГц в соответствии с международными стандартами ИСО 2372/3 и ИСО 3945. Результаты отображают общее состояние контролируемого оборудования. На рис. 7 показан пример таблицы для оценки интенсивности механических колебаний, из которого видно, что относительное, а не абсолютное увеличение амплитуд механических колебаний является наиболее важным показателем. Увеличение в 2,5 раз (8 дБ) указывает на изменение состояния согласно упомянутой выше классификации, в то время как увеличение в 10 раз (20 дБ) указывает, что амплитуда механиче-

ских колебаний достигла опасной величины.

Ежемесячный анализ механических колебаний

Один раз в месяц сигналы, отображающие механические колебания во всех точках замера всех 98 машин, записываются на ленту с помощью измерительного магнитофона. На выполнение данной процедуры требуется примерно 3 дня.

Зарегистрированные сигналы вводятся в находящуюся в лаборатории систему мониторизации для проведения виброанализа. Отдельные спектры механических колебаний сравниваются с ранее зарегистрированными опорными спектрами. Увеличения амплитуд механических колебаний на определенных частотах регистрируются, а интенсивность определяется сравнением их с заданными критериями на основе упомянутой выше таблицы интенсивности механических колебаний. Все дефекты, выявленные в соответствующем процессе, подвергаются анализу для определения их причин. Тенденции увеличения амплитуд механических колебаний вычисляются для определения времени достижения критического уровня.

Процедура рапортования

В завершение ежемесячного анализа составляется рапорт, информирующий о результатах выполнения программы мониторизации. В случае обнаружения потенциально аварийной машины, составляется рекомендация о техническом обслуживании с сопровождающим ее нарядом на выполнение работ. После исполнения ремонтных работ, обнаруженные неполадки рапортуются ремонтной бригадой в отдел профилактики для проведения оценки.

Примеры применения системы мониторизации состояния машинного оборудования с целью поиска и определения причин дефектов

Насосы охлаждения реактора

Данное оборудование, т.е. вертикальные центробежного типа насосы с приводом от электромоторов, мощностью 7000 л.с., используется для обеспечения циркуляции охлаждающей воды в реакторе.

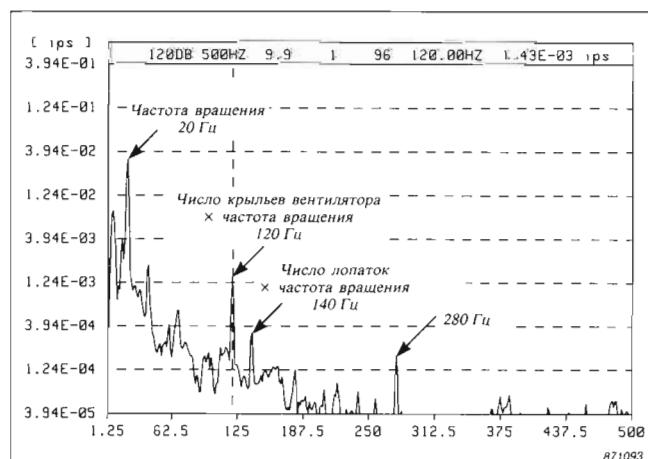
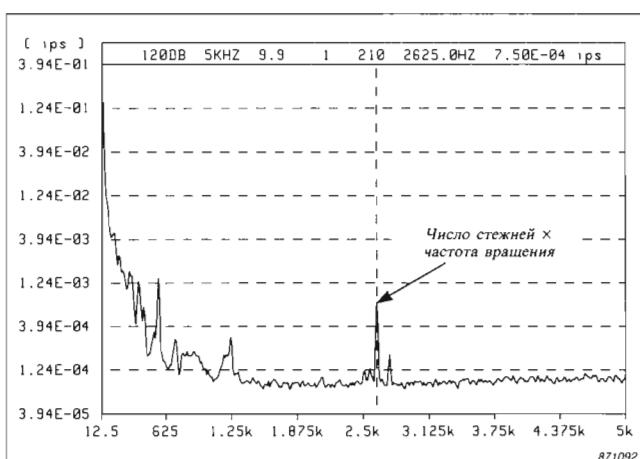
В связи со значимостью этих насосов и их расположением в изолированном сооружении, доступ в которое ограничен, они оборудованы альтернативной (не изготовленной фирмой Брюль и Клер) системой постоянной мониторизации с выводом отображающих амплитуды широкополосных механических колебаний данных на монитор пульта управления реактором. Для выполнения анализа механических колебаний, специалисты используют измерительный магнитофон 7007 для записи сигналов, снимаемых с выводов монитора и подвергаемых частотному анализу в лаборатории.

Данные насосы демонтируются по одному для инспекции и техобслуживания во время остановки реактора для пополнения его топливом. Во време-

ни одной из таких инспекций было замечено, что некоторые из стержней ротора электродвигателя имеют трещины. Вследствие этого был проведен подробный анализ механических колебаний остальных насосов для определения масштабов распространения данного дефекта. Анализ показал, что все шесть насосов обеих реакторных установок (установлено три насоса на каждый реактор) имеют трещины стержней роторов. Эти дефекты были обнаружены в виде пиков спектров механических колебаний при частоте, соответствующей частоте вращения, умноженной на количество стержней (1185 об/мин × 133 стержня), см. рис. 8.

Специалисты имели возможность непрерывного наблюдения за состоянием данных насосов и информировали отдел техобслуживания о том, который из насосов требует ремонта. Вследствие успеха при обнаружении описанного дефекта насосов аппаратура для мониторизации была немедленно отправлена на другую атомную электростанцию фирмы Вирджиния Паур, где был обнаружен подобный дефект.

Интересно отметить, что в связи с малой амплитудой вызываемых данными трещинами механических колебаний, информация от стационарно установленных широкополосных преобразователей системы мониторизации состояния насосов не показывала признаков отклонения этого состояния. Это еще раз показано на рис. 9, где четко видно преимущество использования виброанализа и сравнения спектров для диагностики дефектов. Все важные частотные составляющие могут быть безошибочно опознаны и даже самые незначительные увеличения уровня механических колебаний могут быть обнаружены при сравнении спектров. С другой стороны, при контроле в широкой частотной полосе необходимо значительное и превышающее уровень доминирующую пике увеличение амплитуды механических колебаний с тем, чтобы обнаружить ухудшение состояния контролируемого оборудования или узла.



Мотор-генераторные установки узлов привода управляющих штанг

Данные мотор-генераторные установки снабжают энергией приводы механизмов управляющих штанг реактора. Генератор синхронного типа, мощностью 438 кВА, приводится во вращение электромоторами мощностью 150 л.с. Для обеспечения постоянной нагрузки на оси между генератором и электродвигателем имеется маховик массой около 680 кг.

В процессе текущего еженедельного виброконтроля с помощью портативного виброметра 2516 на генераторе был отмечен высокий уровень механических колебаний. Соответствующие сигналы были записаны на измерительный магнитофон 7007 для проведения виброанализа в лаборатории.

На рис. 10 показан результат сравнения спектров сигнала, снятого с внутреннего подшипника генератора. Этот результат показывает значительное увеличение амплитуд механических колебаний в диапазоне высоких частот, характерное для дефекта роликового элемента подшипника. Данный подшипник находил-

ся в относительно развившейся стадии повреждения.

Были высказаны опасения, что создаваемая тяжелым маховиком нагрузка может в итоге вызвать повреждение подшипника с аварийными последствиями и вероятным ущербом генератору (стоимость по смете около 50000 долларов). Это могло вызвать остановку электростанции. Ремонтные бригады были оперативно вызваны для замены поврежденного подшипника. Мотор-генераторная установка была вновь пущена в эксплуатацию через сутки.

Насосы питающей воды парогенератора

Данные горизонтальные, одноступенчатые, центробежного типа насосы питают водой парогенератор. Насосы приводятся во вращение двумя напрямую соединенными по схеме tandem электродвигателями. В связи с большим расходом пара во время работы установки на полную мощность, два из трех насосов находятся в эксплуатации, а третий в резерве. Если, предположительно, один из работающих насосов выйдет из строя, то ре-

зервный насос должен включиться и набрать полную мощность в течение нескольких секунд для предотвращения уменьшения мощности установки или остановки реактора в связи с низкой производительностью парогенератора.

На участке наружного электродвигателя одного из насосов были замечены высокие осевые механические колебания с частотой, соответствующей удвоенной частоте вращения (120 Гц). Сравнение спектров зарегистрированных на этом участке механических колебаний (см. рис. 11) показало явное увеличение на частоте 120 Гц. На основе этих данных и опыта было сделано предположение, что насос и оба его электродвигателя имеют нарушение соосности.

После разборки наружного электродвигателя осмотр показал наличие повреждения плеча втулки подшипника. Плечи вала, вероятно, в результате нарушения соосности, врезались в подшипник. Расчеты показали, что повреждение было настолько серьезным, что в случае отсутствия системы мониторизации оно могло вызвать аварию в течение одной недели.

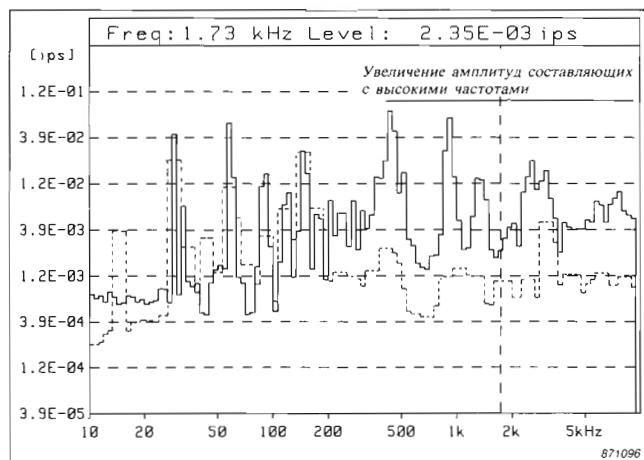


Рис. 10. Результат сравнения спектров механических колебаний мотор-генераторного привода управляющих штанг показывает значительное увеличение амплитуд составляющих в области средних и высоких частот

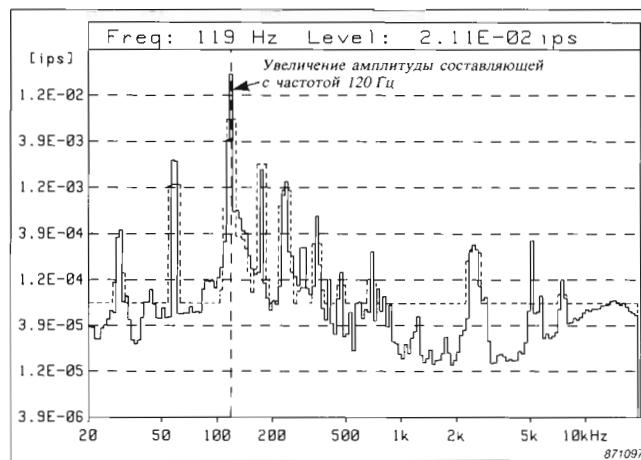


Рис. 11. Результат сравнения спектров механических колебаний насоса питающей воды парогенератора, показывающий увеличение амплитуды составляющей с частотой 120 Гц

Дренажные насосы нагревателя в системе низкого давления

Горизонтальные насосы, по 500 л.с., используются для подачи от турбины подогретого конденсата низкого давления в основной поток конденсата.

Были отмечены высокие уровни механических колебаний на внутренней втулке подшипника одного из таких насосов. На рис. 12 показан результат сравнения спектров, указывающий на значительное увеличение на частоте 120 Гц, соответствующей удвоенной частоте вращения. Для проведения инспекции было необходимо остан-

нить насос, что привело бы к недопустимому в соответствующий момент уменьшению производительности установки. По существу, рассматривалась необходимость продолжать эксплуатацию насоса, по крайней мере, еще неделю.

Виброанализатор 2515 был использован для ежедневной мониторизации состояния упомянутого неисправного подшипника. На рис. 13 показаны тенденции изменений амплитуды механических колебаний с частотой 120 Гц. Наблюдалась стабилизация и даже небольшое уменьшение ампли-

туды этой составляющей механических колебаний.

Были подготовлены запчасти и ремонт назначен на выходной день, когда потребление энергии было минимальным. В процессе ремонта был заменен поврежденный подшипник. При запуске насоса был снова использован виброанализатор 2515. Последний замер механических колебаний (см. рис. 13) показывает, что амплитуда механических колебаний возвратилась к норме.

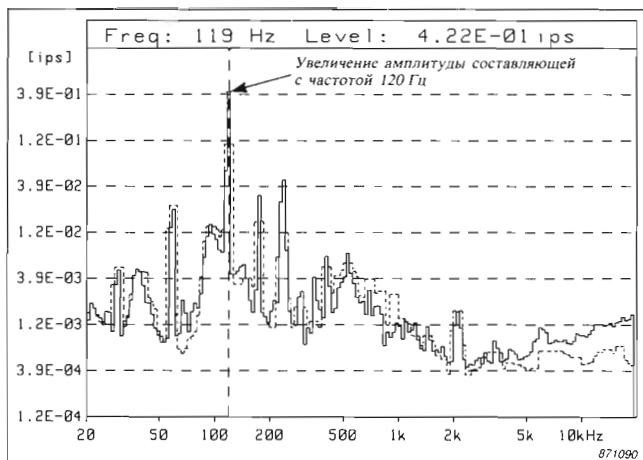


Рис. 12. Результат сравнения спектров механических колебаний насоса низкого давления нагревателя, показывающий значительное увеличение амплитуды составляющей с частотой 120 Гц

Главная турбинная установка

Турбинная установка (970 мВт, 1800 об/мин) состоит из одной турбинной камеры двойного потока высокого давления и двух камер двойного потока низкого давления. Комплект турбина-генератор оборудован системой постоянной мониторизации, установленной специалистами электростанции и состоящей из системы датчиков на вале турбины с выводом на монитор значений уровня широкополосных механических колебаний. Монитор расположен на пульте управления реактором. Для анализа механических колебаний турбины предусмотрена система фирмы Брюль и Кьер.

Летом 1986 года секция № 1 низкого давления турбины понесла тяжелые повреждения лопаток. Эти повреждения привели к замене роторного вала. Зимой 1987 года, уровень механических колебаний подшипника № 4, связанного с секцией низкого давления, начал увеличиваться. Опасаясь повторения предыдущей аварии, сигнал механических колебаний от подшипников секции низкого давления турбины подвергался ежедневному частотному анализу и анализу тенденций. Результаты направлялись начальнику отдела техобслуживания на рассмотрение. На рис. 14 показан результат сравнения спектров механических колебаний турбины, указывающий на увеличение амплитуды

составляющей с частотой 30 Гц, соответствующей частоте вращения. Рис. 15 показывает график тенденций на данной частоте. Механические колебания подшипника № 4 показывают значительное увеличение, в то время как остальные подшипники находятся в устойчивом состоянии (для упрощения показаны только данные подшипников №№ 4 и 5).

Проводимая ежедневно мониторизация состояния способствовала прианию чувства уверенности у руководства в том, что признаки неизбежного выхода из строя турбины могут быть опознаны с запасом времени, достаточным для предотвращения серьезной аварии.

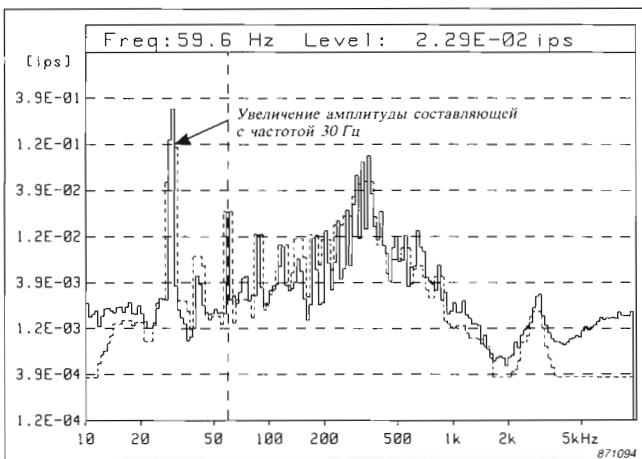


Рис. 14. Результат сравнения спектров механических колебаний турбины, показывающий увеличение амплитуды составляющей с частотой 30 Гц

Охлаждающие насосы трансформаторов

Данные насосы малой мощности (5 л.с.) применяются для подачи охлаждающего масла на главные повышающие трансформаторы.

В связи с частыми отказами трансформаторов было принято решение обо-

рудовать последние системой мониторизации. Высказывались опасения, что вкладыши роторов насосов подвергаются сильному износу вследствие трения крыльчатки о корпус и, в результате этого, ожидалось попадание частиц металла в охлаждающее масло. Такое загрязнение масла могло серьезно повлиять на безопас-

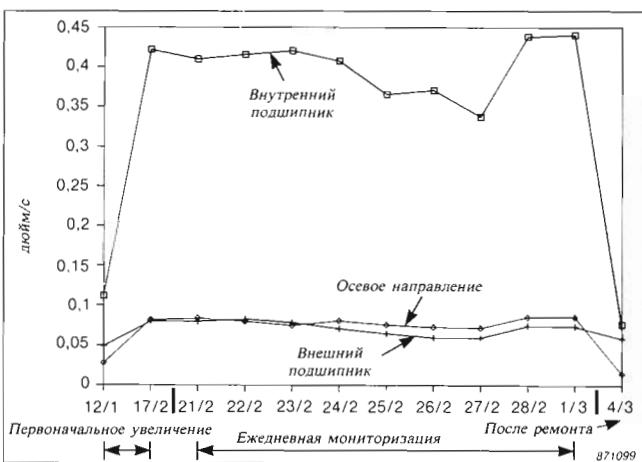


Рис. 13. График тенденций изменений амплитуды составляющей с частотой 120 Гц механических колебаний насоса низкого давления нагревателя

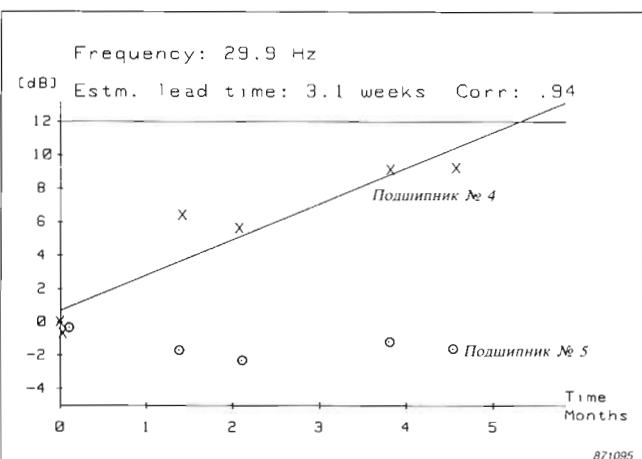


Рис. 15. График тенденций изменений амплитуды составляющей с частотой 30 Гц механических колебаний турбины

ность эксплуатации трансформаторов.

На рис. 16 показан узкополосный спектр механических колебаний одного из упомянутых насосов. Спектр показывает выраженные гармоники частоты 30 Гц, т.е. основной частоты вращения ротора насоса. На рис. 17

показан расширенный узкополосный спектр с четко выраженной периодичностью, относящейся к частоте 30 Гц. После ознакомления с соответствующими данными, начальник подстанции принял решение заменить все насосы во время остановки реактора для пополнения его топливом. Это была дорогостоящая процедура,

включавшая слияние нескольких тысяч литров охлаждающего масла, но в сравнении со стоимостью аварии трансформатора, относительно недорогая.

Во время инспекции насосов было обнаружено повреждение подпятников. Однако, при внимательном осмотре

подозрение пало на крепежные детали насосов, вызывавшие излишнюю вибрацию последних. Дефект крепежных деталей являлся причиной появления пиков, показанных на рис. 16 и 17, поскольку ненадежное крепление сопровождается появлением большого числа гармоник.

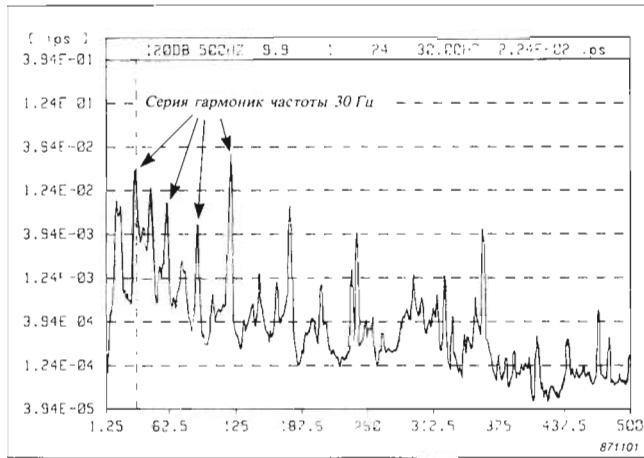


Рис. 16. Узкополосный частотный спектр механических колебаний насоса в системе охлаждения трансформатора, показывающий наличие серии гармоник частоты 30 Гц

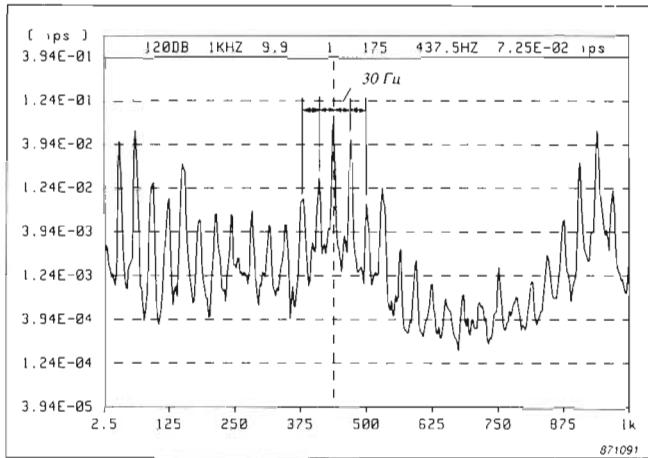


Рис. 17. Расширенный узкополосный частотный спектр механических колебаний насоса в системе охлаждения трансформатора

Вертикальные циркуляционные насосы

Эти насосы имеют очень большую производительность - 1 миллион литров в минуту. Данные вертикальные насосы обеспечивают циркуляцию озерной воды в конденсатной колонне для конденсации выходного пара из турбин низкого давления.

При креплении одного из циркуляционных насосов была предпринята попытка отсечь его закрытием выпускного клапана с приводом от электродвигателя, что привело к срыву диска со штока и его заклинению. При отключении от сети электродвигателя насос начал вращение в обратную сторону за счет обратного потока воды через насос в направлении заборного отверстия и в озеро. Поскольку направление вращения и гидродинамических сил насоса изменились, было неясно, какой ущерб будет нанесен электродвигателю и насосу.

Вместо того, чтобы остановить энергоустановку, было принято решение проводить мониторизацию механических колебаний насоса и прогнозировать тенденции изменений создаваемых им механических колебаний дважды в сутки с рапортованием результатов начальнику отдела техобслуживания. Руководство разрешило эксплуатацию энергоустановки до момента, удобного для ее остановки, будучи уверенным, что при ухудшении состояния электродвигателя или насоса ежедневный анализ механических колебаний покажет это с упреждением времени, достаточным для предотвращения большой аварии. Индикация ухудшения состояния не

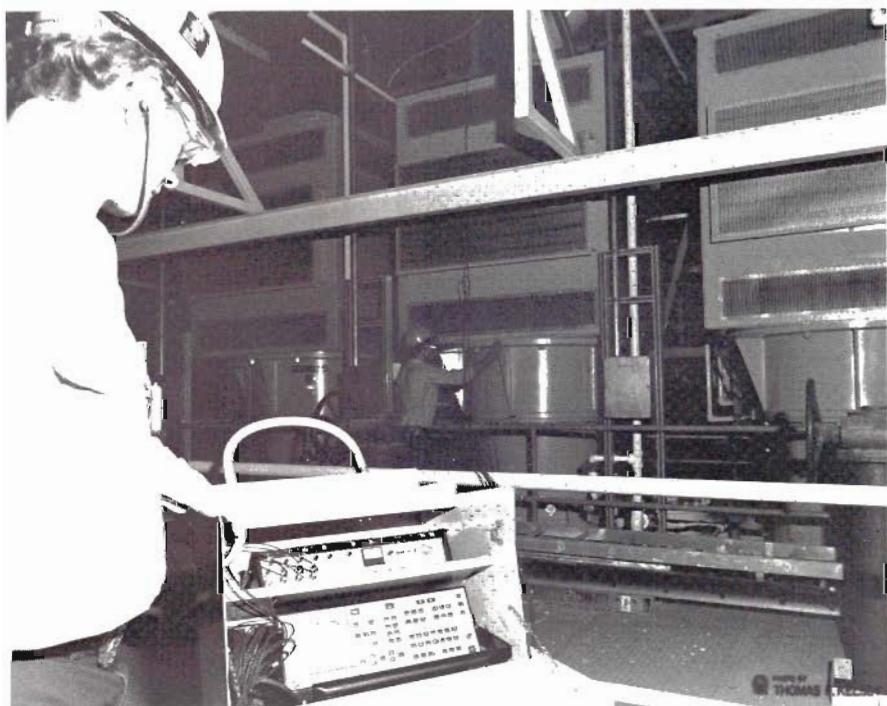


Рис. 18. Запись на измерительный магнитофон 7007 механических колебаний вертикального насоса конденсата

была обнаружена и установка находилась в эксплуатации 2 дополнительных месяца. Последующая инспекция электродвигателя не определила наличия в нем повреждений.

Балансировка вентиляторов паровых сальников

Данные подвесные вентиляторы обеспечивают уплотнение турбин для предотвращения поступления воздуха

во внутрь паровой турбины и выброса из нее пара.

Вентиляторы были известны тем, что в связи со сложностью их балансировки они «расходовали» один комплект подшипников в год. Обычно вентиляторы демонтировались и заново балансировались в мастерской, поскольку балансировка вентиляторов на месте их эксплуатации по

причине нестабильности конструкций их крепежных деталей рассматривалась проблематичной. Однако специалисты, используя комплект 3537, смогли успешно отбалансировать вентиляторы и уменьшить создаваемые ими механические колебания до приемлемого уровня.

Аварийные дизель-генераторы

Два аварийных дизель-генератора предназначены для подачи аварийного снабжения на каждую рекаторную установку. Обе установки наддува каждого дизеля, а также основные валы и подшипники подвергались мониторизации во время испытательных пробегов. Установка постоянной системы мониторизации для автоматического контроля состояния дизелей в данное время находится в стадии рассмотрения.

Заключение

Задачи, поставленные электростанцией Норт Ана при установке системы мониторизации и заключавшиеся в уменьшении вынужденных простоев оборудования и максимальной утилизации имеющихся мощностей, были успешно выполнены. Данная брошюра, касающаяся опыта использования упомянутой системы, показала на ряде примеров успешное применение программы мониторизации для обнаружения и диагностики дефектов машинного оборудования. Был предупрежден не только целый ряд возможных отказов оборудования с катастрофическими последствиями, но во многих случаях обнаруженные неполадки находились под тщательным контролем с целью предупреждения поломок оборудования с опасностью аварии. Таким образом, осуществлялась безопасная оптимизированная эксплуатация оборудования до момента переключения нагрузки на свободное оборудование или подхода своей очереди по графику техобслуживания, сокращая до минимума перебои в работе.

Благодаря внедрению системы мониторизации, отдел технического обслуживания получил возможность изменить традиционный метод профилактических ремонтов. В настоящее время обслуживающий персонал имеет возможность заострять свое внимание на прогнозируемом техобслуживании, где ремонтные работы проводятся на основе периодического виброанализа механических колебаний машинного оборудования.

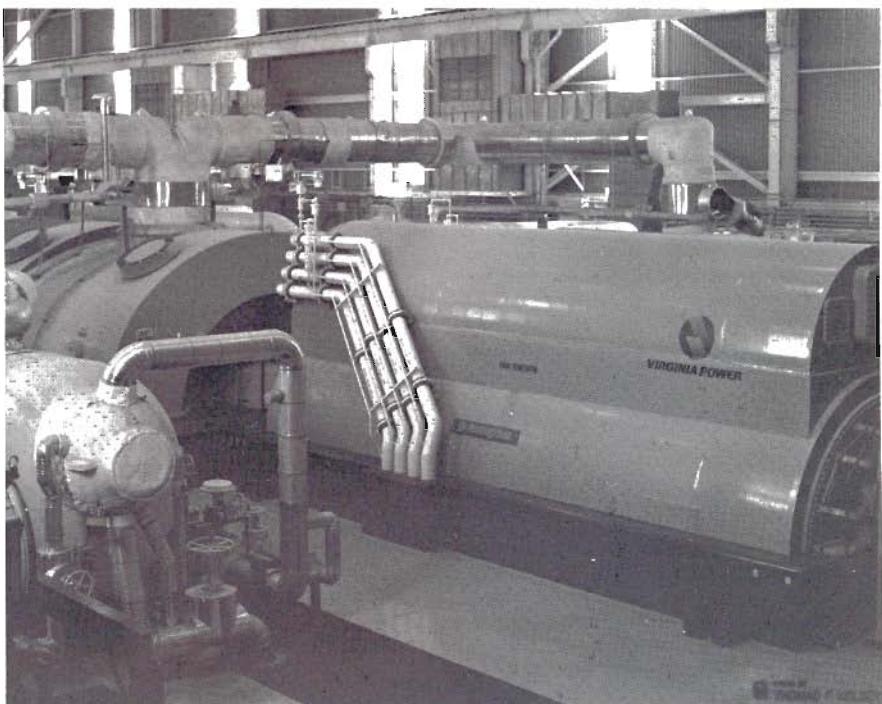


Рис. 19. Главная гурбина электростанции Норт Ана

Многомиллионная экономия

При стоимости простоя реактора, по оценке, равной 1 миллиону рублей в день, экономическое стимулирование поддержания работоспособности предприятия играет огромную роль. Так например, производственные показатели атомной электростанции Норт Ана фирмы Вирджиния Паур превышают средние показатели по всей отрасли американской промышленности пятый год подряд. Эта рекордная цифра во многом является заслугой программы мониторизации состояния машинного оборудования. В 1984 г., году внедрения программы мониторизации, по подсчетам, было сэкономлено около 2 миллионов рублей, а в 1985 г. - около 3,5 миллионов рублей. Цифры эти значительные, в особенности, учитывая общее состояние машинного парка энергетической отрасли. Строительство многих атомных электростанций было пересмотрено, а количество новых тепловых энергостанций еще не определено. Перед отраслью поставлена задача улучшить надежность существующих электростанций, многие из которых эксплуатируются дольше своих запроектированных сроков. Опыт использования программы мониторизации на атомной электростанции Норт Ана показал, что при-

менение основанных на контроле механических колебаний систем мониторизации состояния машинного оборудования является жизнеспособным подходом для улучшения надежности машин с вращающимися элементами.

Мониторизация на тепловых энергостанциях

Реактор, парогенератор и большие насосы, перекачивающие воду между ними, установлены в отдельном изолированном сооружении. Данные узлы ядерной энергоустановки являются единственным оборудованием атомной электростанции, которое не входит в состав тепловой энергостанции. Мониторизация состояния турбины, генератора, множества насосов питающей воды и большого количества вспомогательного оборудования (компрессоров, вентиляторов и т.д.), расположенных вне изолированного сооружения, идентична для всех типов паровых генераторных станций. Данная брошюра, описывающая опыт применения системы мониторизации, имеет целью показать преимущества использования соответствующих систем на тепловых станциях на основе опыта атомной электростанции Норт Ана.

Старшие техники Майк Армстронг и Дон Кричфилд из электротехнической мастерской при атомной электростанции Норт Ана в начале 1984 г. были переведены на новую работу с целью организации отдела профилактики на основе виброанализа и с этого времени постоянно выполняют работу по программе мониторизации. Их задачей является наладить связь между системой мониторизации атомной электростанции Норт Ана с идентичной системой в Сури - другой атомной электростанции фирмы Вирджиния Паур. Через телекоммуникационный канал связи, в обе стороны будет осуществляться прямой доступ к источникам информации обеих станций с целью сравнения данных, относящихся к состоянию аналогичного машинного оборудования этих электростанций.

Автор статьи выражает благодарность Майку Армстронгу и Дону Кричфилду за их помощь при подготовке данной брошюры. Автор благодарит также начальника станции Вейна Харелла, начальника отдела технического обслуживания Майка Кенслера и старшего инженера по техническому обслуживанию Джима Кайзера за выдачу разрешения посетить атомную электростанцию Норт Ана и написать о ней.



Список машин, оборудованных мониторизацией

Вспомогательное сооружение и здание оборудования безопасности

Мотор-генераторная установка для привода управляющих штанг (2 шт)
Вентиляторы иодовых фильтров (2 шт)
Насосы насыщения бором (3 шт)
Низконапорные инжекторные насосы безопасности (3 шт)
Циркуляционные насосы спринклеров (2 шт)
Насосы систем охлаждения (2 шт)
Воздушные компрессоры для КИП (3 шт)
Турбина (1 шт)
Вспомогательные питающие насосы половинной мощности (1 шт)

Сооружение мокрого гашения

Насосы мокрого гашения (2 шт)

Изолированное сооружение

Насосы охлаждения реактора (3 шт)
Насосы системы удаления остаточного тепла (2 шт)
Вентиляторы охлаждения каркаса управляющих штанг (6 шт)
Вентиляторы циркуляции воздуха (3 шт)
Вытяжные вентиляторы ячеек охлаждающих насосов реактора (3 шт)

Турбинное сооружение

Турбина и генератор (1 шт)
Масляный насос высокого давления турбины (1 шт)
Водяные насосы охлаждения подшипника турбины (2 шт)

Масляный насос воздушного уплотнения турбины (1 шт)

Дублирующий масляный насос уплотнения высокого давления турбины (1 шт)

Вытяжные вентиляторы парового сальника турбины (2 шт)
Вентиляторы охлаждения токоотводов генератора (2 шт)

Масляный насос азотного уплотнения генератора (1 шт)

Вытяжка паров из масляного резервуара генератора (1 шт)
Вытяжка паров из подшипника генератора (1 шт)

Питающие насосы парогенератора (3 шт)

Насосы конденсата (3 шт)
Насосы системы осушения подогревателя высокого давления (3 шт)
Насосы системы осушения подогревателя низкого давления (2 шт)

Другое оборудование

Масляные циркуляционные насосы главного трансформатора (3 шт)
Водяные циркуляционные насосы (4 шт)
Аварийные дизель-генераторы (2 шт)
Противопожарный насос тушения электрооборудования (1 шт)



БРЮЛЬ И КЬЕР

Нэрум, Дания

Импортер: **В/О МАШПРИБОРНТОРГ**

121200 Москва, Смоленская пл. 32/34, тел. 244-37-30



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