

Вибромониторинг вспомогательного оборудования АЭС с помощью комплекса "РУБИН"

Трунин Е.С. к.т.н., Тараканов В.М. (ООО "ДИАМЕХ 2000"), Костин А.В. (Балаковская АЭС)

Рассматривается применение комплекса "РУБИН" для непрерывного мониторинга и диагностики вибрации на ответственных насосах маслоснабжения подшипников турбоагрегата и гидropодъёма валов, а также на насосах маслоснабжения системы регулирования и защиты турбины АЭС.

Безопасность АЭС определяется множеством факторов, одним из которых является вибрационная надёжность как основного, так и вспомогательного оборудования.

Для улучшения диагностики вибрационного состояния оборудования, а значит, повышения его вибрационной надёжности крайне важен переход от периодического контроля с помощью переносных средств измерений к непрерывному мониторингу стационарными системами, основанными на современных цифровых технологиях.

По инициативе Балаковской АЭС, поддержанной ОАО "Концерн Росэнергоатом", в рамках подготовки к внедрению отраслевой системы диагностирования (ОСД), на станции начался процесс расширения зон виброконтроля роторного вспомогательного оборудования.

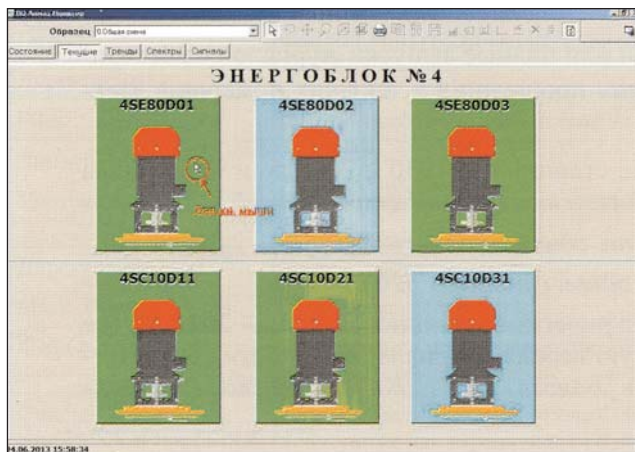


Рис. 1 Общая схема насосов маслоснабжения энергоблока №4 Балаковской АЭС, оснащенных системой вибромониторинга "РУБИН"

Первым шагом в этом направлении стало оснащение маслоснасосов энергоблока № 4 системой "РУБИН" производства "ДИАМЕХ 2000".

Под контролем находятся насосы: маслоснабжения системы автоматического регулирования и защиты с рабочей частотой вращения $n=3000$ об/мин в количестве 3 шт. (маркировка в базе данных — 4SE80D01, 4SE80D02 и 4SE80D03); системы смазки подшипников турбогенератора и гидropодъёма роторов с рабочей частотой враще-

ния $n=1500$ об/мин в количестве 3 шт. (маркировка в базе данных — 4SC10D11, 4SC10D21 и 4SC10D31).

Контролируемые агрегаты представлены на схеме (рис. 1). Их общее состояние определяется цветовой индикацией:

зелёный цвет — вибрация в норме;
жёлтый цвет — предупреждение;
красный цвет — аварийный уровень вибрации;
цвет морской волны — останов блока (отсутствует вращение).

Данные обновляются каждые 2 с.

Детализированная схема одного из контролируемых насосов (рис. 2) отображает текущие значения параметров — виброскорости, температуры и тока двигателя. На данной схеме также присутствует цветовая индикация, аналогичная описанной: цвет символов соответствует уровню уставки (норма, предупреждение, авария).

Для того чтобы вернуться на главную схему, достаточно нажать соответствующий текстовый элемент на схеме. Если щёлкнуть левой кнопкой мыши по числу, представляющему текущее значение параметра, то отобразится его тренд в заданной точке к текущему моменту времени.

Системный подход. Анализ вибрационного состояния шести насосов, расположенных на общем основании и связанных маслопроводами с турбоагрегатом типа K-1000-60/1500-2, требует системного подхода.

Дело в том, что насосная группа маслоснабжения (НГМ) имеет вибрационные связи: как внутренние — между насосами через общее основание, так и внешние — с маслопроводами (М) и через них с турбоагрегатом (Т), и в общем случае необходимо рассматривать вибрационные свойства НГМ как часть системы "НГМ — М — Т" (рис. 3).

Внешними источниками вибрации могут быть собственные колебания отдельных фрагментов маслопроводов на своих характеристических частотах или вынужденные колебания, передаваемые от

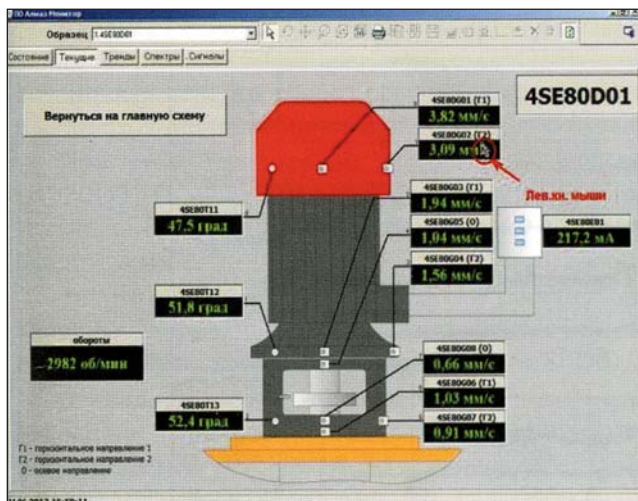


Рис. 2. Точки диагностирования вибрационного состояния насосного агрегата с помощью системы "РУБИН"

турбоагрегата на частоте его работы $f = 25$ Гц. В данном исследовании, основанном на базе данных, наработанной с помощью комплекса "РУБИН", рассматриваются вибрационные особенности собственно насосной группы маслоснабжения.

Диагностирование. Комплекс "РУБИН" предоставляет полный набор инженерных функций для целей диагностики вибрационного состояния оборудования:

- сигналы с датчиков;
- спектры вибрации;
- среднеквадратичные значения (СКЗ) виброскорости в стандартной полосе частот (10 — 1000 Гц);
- СКЗ виброскорости в высокочастотной области (1000 - 8000 Гц);
- специальные диагностические параметры вибрации — пик-фактор, эксцесс и др.

После наработки базы данных и выбора алгоритмов анализа представляется возможным сделать переход к автоматической диагностике.

Анализ проводился отдельно по насосам системы регулирования и защиты ($n=3000$ об/мин) и насосам смазки подшипников и гидроподъема ($n=1500$ об/мин).

Были построены графики изменения среднеквадратичных значений скорости вибрации по всем точкам контроля шести насосов, определены точки с наибольшим уровнем вибрации. Забегая вперед, отметим, что вибрация всех насосов находилась в пределах нормы [1,2], причём уровень вибрации обычно понижался при остановке насосов.

Однако был обнаружен один насос, 4SE80D01, работающий на систему регулирования, поведение которого было нетипичным (рис. 4).

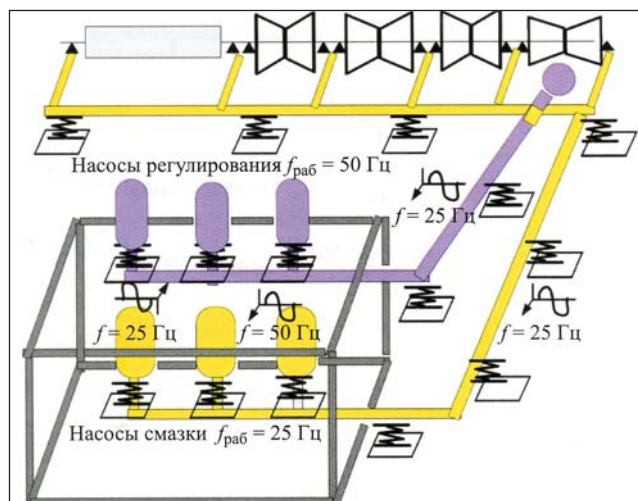


Рис. 3. Насосная группа маслоснабжения и ее вибрационные связи

Из графиков, представленных на рис. 4, видно, что СКЗ скорости вибрации этого насоса на всех точках контроля при работе не превышают 4,5 мм/с (норма), наибольшая вибрация наблюдается в верхней части агрегата.

В большинстве точек контроля вибрация на остановленном с 11 по 22 июня 2013г. насосе 4SE80D01 оказалась соизмеримой с её уровнем до отключения насоса (период с 22 мая по 10 июня) и значительно превысила вибрацию данного агрегата после повторного включения и выхода на стационарную работу (24 июня - 25 июля 2013 г.). Из этого можно сделать вывод, что источник вибрации находится вне насоса регулирования 4SE80D01.

Для выяснения возможных причин были рассмотрены графики работы всех насосов (рис. 5).

Согласно эксплуатационным требованиям, в целях максимальной надёжности работы турбоагрегата в работе должны одновременно находиться четыре насоса — точнее, две пары насосов (пару составляют насос смазки подшипников и насос снабжения маслом системы регулирования). Комбинация пар меняется по оперативному графику.

Одновременный анализ рис. 4 и 5 показывает, что уровень вибрации на первом остановленном насосе 4SE80D01, работающем на регулирование, зависит от комбинации остальных работающих насосов. При двух остановках насоса 4SE80D01 уровни вибраций в одной и той же точке — на верхнем подшипнике (рис. 4, кривая 8) — существенно различаются: в июне 2013 г. на неработающем насосе среднеквадратичное значение виброскорости $V_{скз} \sim 4,0$ мм/с, тогда как на остановленном в июле 2013 г. насосе $V_{скз} \sim 1,5$ мм/с.

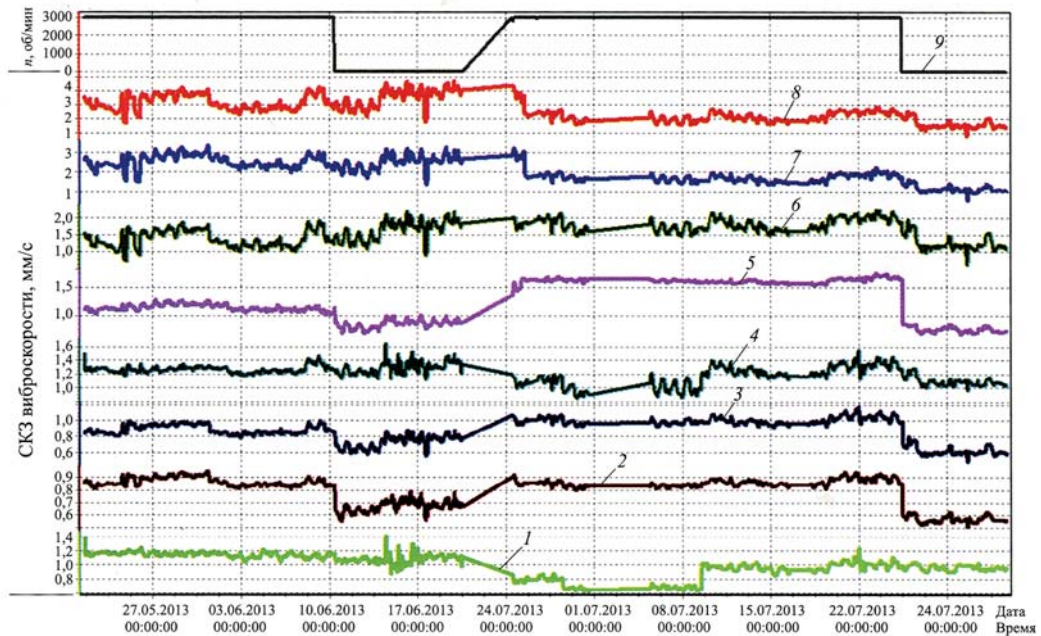


Рис. 4. Обзорные тренды СКЗ виброскорости (с 22 мая по 2 августа 2013 г.) по всем точкам контроля насоса 4SE80D01 (обозначения см. рис. 2):
 1 — 4SE80G08; 2 — 4SE80G07; 3 — 4SE80G06; 4 — 4SE80G05; 5 — 4SE80G04; 6 — 4SE80G03; 7 — 4SE80G02; 8 — 4SE80G01; 9 — частота вращения насоса, об/мин

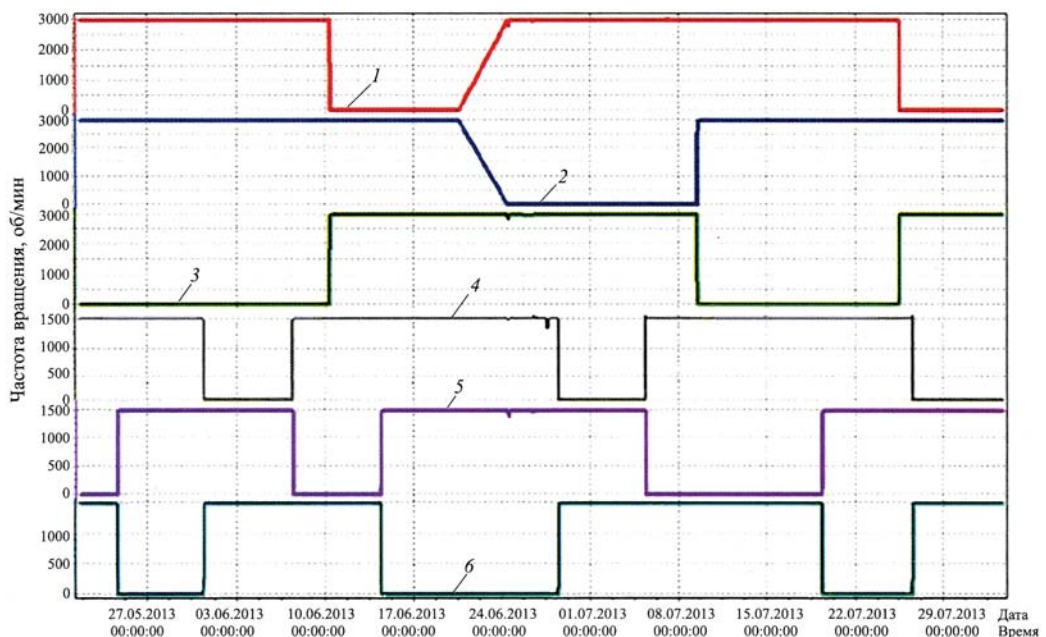


Рис. 5. Оперативные графики работы насосов с 22 мая по 2 августа 2013 г.:
 1 — 4SE80D01; 2 — 4SE80D02; 3 — 4SE80D03; 4 — 4SC10D11; 5 — 4SC10D21; 6 — 4SC10D31

Сочетание работающих насосов и вибрация.

Были рассмотрены условия работы всех групп насосов с 22 мая по 3 августа 2013 г.

Влияние второго и третьего насосов регулирования на первый насос регулирования. При двух остановках первого насоса регулирования остальные постоянно находились в работе.

При этом при первом отключении агрегата 4SE80D01 (в июне 2013 г.) $V_{скз}$ составила приблизительно 4 мм/с, а при втором (в июле 2013 г.) — около 1,5 мм/с.

Таким образом, работа второго и третьего насосов регулирования не оказывает влияния на вибрацию первого насоса регулирования 4SE80D01.

Влияние насосов смазки на первый насос регулирования. При двух остановках первого насоса регулирования 4SE80D01 изменялось сочетание работы трёх насосов смазки:

при первом отключении в июне 2013 г. $V_{скз} \sim 4,0$ мм/с, а в работе находились первый 4SC10D11 и второй 4SC10D21 насосы смазки;

при втором отключении в июле 2013 г. $V_{скз} \sim 1,5$ мм/с, а в работе находились второй 4SC10D21 и третий 4SC10D31 насосы смазки.

Таким образом, при работе первого насоса смазки 4SC10D11 вибрация на рядом находящемся остановленном насосе регулирования 4SE80D01 достигает 4,0 мм/с, при отключении насоса смазки вибрация на остановленном насосе регулирования составляет около 1,5 мм/с.

Из этого следует, что насос смазки 4SC10D11 оказывает влияние на вибрацию насоса регулирования 4SC80D01.

Связанность колебаний. Взаимное вибрационное влияние смежных агрегатов указывает на связанность колебаний, которую следует учитывать в технологическом и метрологическом плане.

Технологический аспект — это оценка надёжности в режиме статодинамической вибронгрузки на остановленном агрегате при его повышенной вибрации.

Метрологический аспект — это оценка доли внешней вибрации в общем уровне вибрации на работающем агрегате.

Оценка остальных насосов. Для оценки поведения остальных насосов были рассмотрены тренды вибрации в идентичных точках верхних подшипников агрегатов регулирования и смазки (рис. 6).

Анализ показал, что СКЗ виброскорости насосов регулирования ($n=3000$ об/мин) в точках диагностики, соответствующих положению G01 на рис. 2, составляют менее 4,5 мм/с в случае 4SE80D01, менее 3,5 мм/с в случае 4SE80D02 и менее 4,0 мм/с в случае 4SE80D03.

Насосы смазки ($n=1500$ об/мин) имеют в аналогичных точках $V_{скз} < 2,5$ мм/с (4SC10D11), $V_{скз} < 2,0$ мм/с (4SC10D21), $V_{скз} < 3,5$ мм/с (4SC10D31).

Целесообразно особо рассмотреть вибрацию работающих насосов при остановленном первом насосе регулирования 4SE80D01 (рис. 7).

На 20:00 16 июня 2013 г. (на шестой день после отключения насоса регулирования 4SE80D01) текущие СКЗ виброскорости диагностируемых агрегатов на верхнем подшипнике (точка G01 на рис. 2) составили:

3,8 мм/с — для 4SE80D01;
2,9 мм/с — для 4SE80D02 (в работе);
2,7 мм/с — для 4SE80D03 (в работе);
2,1 мм/с — для 4SC10D11 (в работе);
1,8 мм/с — для 4SC10D21 (в работе);
1,2 мм/с — для 4SC10D31 (остановлен).

Из графиков видно, что вибрация верхнего подшипника двигателя регулирования в точке G01 на остановленном насосе 4SE80D01 ($V_{скз} = 3,8$ мм/с) превышает уровни вибрации в идентичных точках на всех (регулирования и смазки) двигателях работающих насосов.

Это означает, что вибрация остановленного агрегата 4SE80D01 имеет корпусной характер, связанный с влиянием внешних источников (повышенная податливость основания — колебания по типу "вертикальной консоли" резонансного характера).

Спектральный анализ. Подробно вибрация насоса регулирования 4SE80D01 рассмотрена на рис. 8, 9.

Анализ рисунков показал, что: первый насос регулирования ($n=3000$ об/мин) в верхней точке G01 (см. рис. 2) имеет две основные частоты вибрации: $f=25$ Гц (несинхронная), $f=50$ Гц (синхронная);

при работе насоса 4SE80D01 в мае - июне 2013 г. его виброскорость на несинхронной частоте составляла приблизительно 3,7 мм/с, при этом в работе находился смежный насос смазки 4SC10D11, рабочая частота которого $f=25$ Гц;

при работе насоса 4SE80D01 в июле 2013 г. его виброскорость на несинхронной частоте составляла приблизительно 1,0 мм/с, при этом смежный насос смазки 4SC10D11 не работал.

Несинхронные вибрации. Источником несинхронной вибрации насоса регулирования 4SE80D01 является работа смежного насоса смазки 4SC10D11.

Необходимо определить собственную частоту "корпус — основание" насоса 4SE80D01 на предмет близости к $f=25$ Гц и выделить долю собственной вибрации на этой частоте².

На рис. 10 представлены полученные нами с помощью комплекса "РУБИН" каскады спектров виброскорости на остановленном насосе регулирования 4SE80D01, которые показывают, что уровень вибрации на несинхронной частоте 25 Гц в точке контроля G01 (см. рис. 2) изменяется приблизительно от 3,4 мм/с при работающем насосе смазки 48C10B11 (июнь 2013 г.) до 0,7 мм/с при остановленном насосе смазки 48C10B11 (июль 2013 г.).

Нами были получены также каскады спектров виброускорения работающего насоса регулирования 4SE80D01 на верхнем подшипнике (рис. 11). Спектры содержат интенсивные сигналы в высокочастотной области, при частоте 475, 575 и 675 Гц.

² По спектрам, измеренным персоналом Балаковской АЭС с помощью переносных приборов, вибрация на верхних точках насоса 4SE80D01 имеет уровень несинхронной частоты $f=25$ Гц, СКЗ виброскорости на ней около 2,0 мм/с (на остальных частотах $V_{скз} < 1,0$ мм/с)

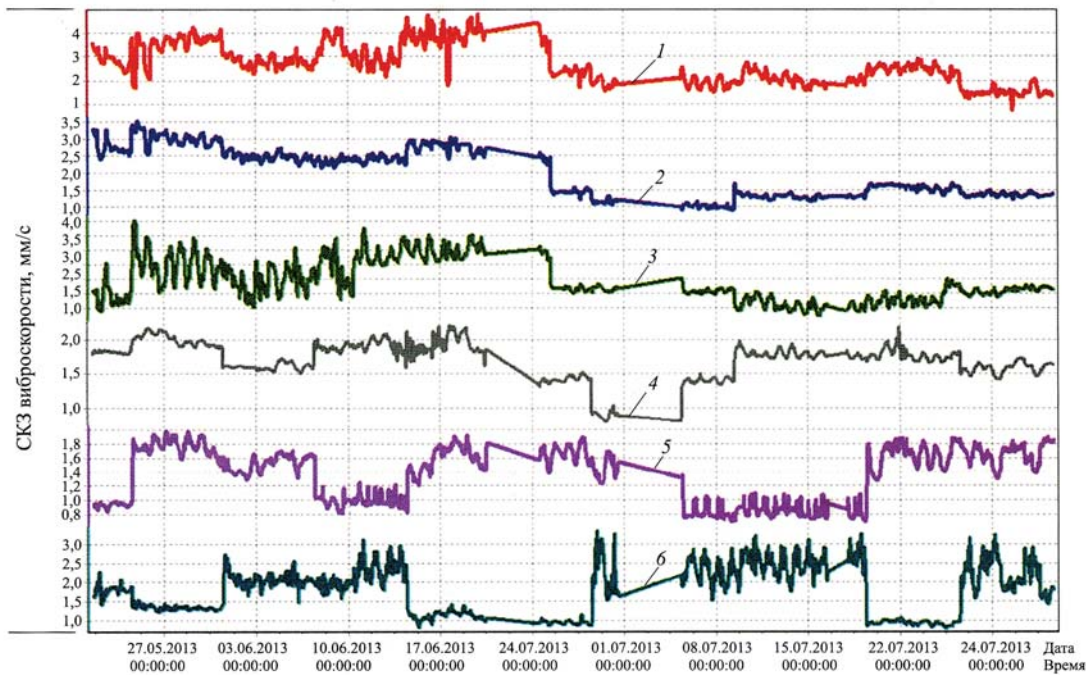


Рис. 6. Обзорные тренды СКЗ виброскорости в идентичных точках контроля на верхнем подшипнике (соответствуют точке G01 на рис. 2) с 22 мая по 2 августа 2013 г.
1 — 4SE80D01; 2 — 4SE80D02; 3 — 4SE80D03; 4 — 4SC10D11; 5 — 4SC10D21; 6 — 4SC10D31

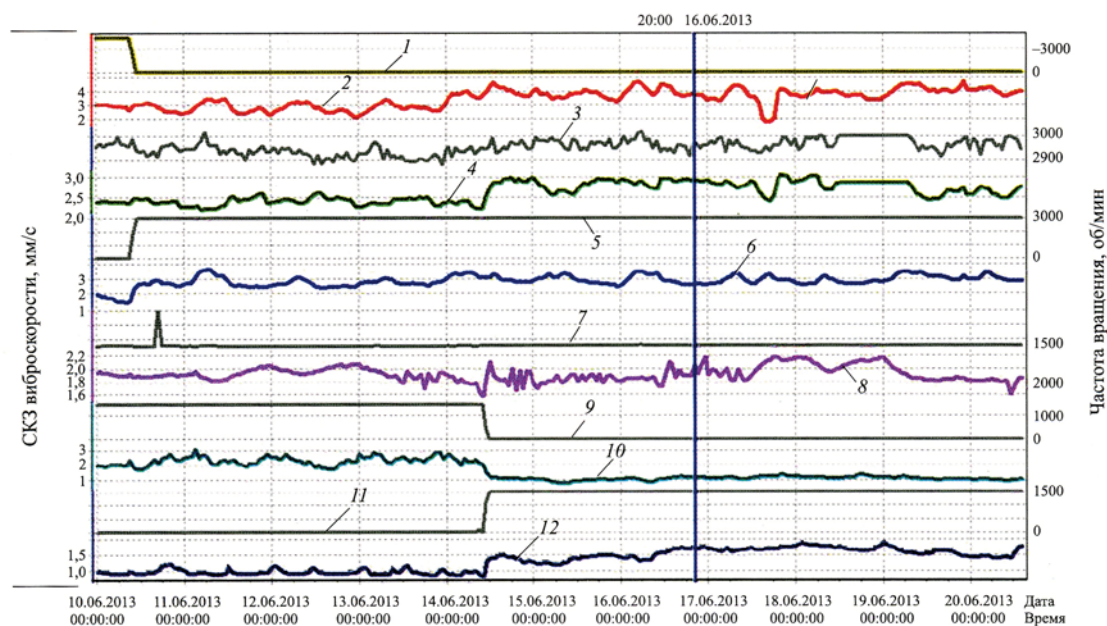


Рис. 7. Графики работы насосов при остановке первого насоса регулирования 4SE80D01 и тренды СКЗ их виброскорости в идентичных точках контроля (соответствуют точке G01 на рис. 2):
1, 3, 5, 7, 9, 11 — график работы насоса 4SE80D01, 4SE80D02, 4SE80D03, 4SC10D11, 4SC10D31, 4SC10D21 соответственно; 2, 4, 6, 8, 10, 12 — тренд СКЗ виброскорости насоса 4SE80D01, 4SE80D02, 4SE80D03, 4SC10D11, 4SC10D31, 4SC10D21 соответственно

Разница частот между пиковыми значениями составляет 100 Гц.

Частоты 575 и 675 Гц не зависят от работы смежных насосов, т.е. принадлежат насосу регулирования 4SE80D01.

Параметр виброускорения несёт энергетическую составляющую, которая воздействует на подшип-

ники. При диагностике он может использоваться как вспомогательный.

На рис. 12 приведены спектры виброускорения на работающем и остановленном насосе регулирования 4SE80D01.

Видно, что высокочастотные составляющие спектра на остановленном насосе отсутствуют.

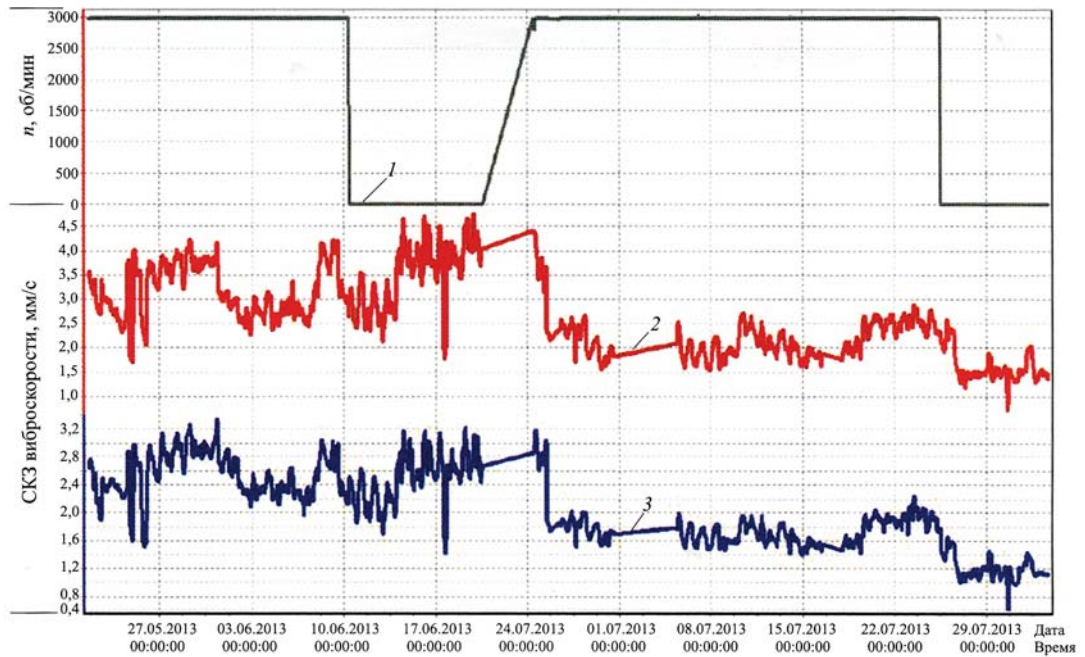


Рис. 8. График работы насоса регулирования 4SE80D01 и изменения СКЗ виброскорости верхнего подшипника его двигателя в двух поперечных направлениях в период с 22 мая по 2 августа 2013 г.:
1 — частота вращения; 2,3 — $V_{СКЗ}$ по датчикам в точке G01 и G02 (рис. 2) соответственно

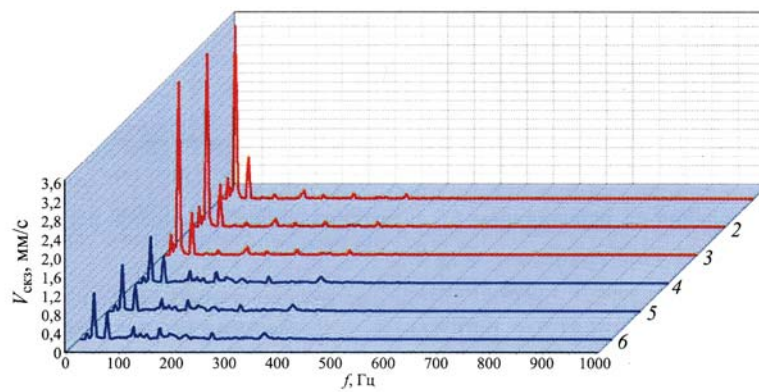


Рис. 9. Каскады спектров виброскорости работающего насоса регулирования 4SE80D01 (место контроля и направление заданы точкой G01 на рис 2):
1 — 28.05.2013; 2 — 29.05.2013; 3 — 03.06.2013; 4 — 06.07.2013; 5 — 15.07.2013; 6 — 22.07.2013; 1 — 3 — насос смазки 4SC10D11 в работе; 4 — 6 — насос смазки 4SC10D11 остановлен

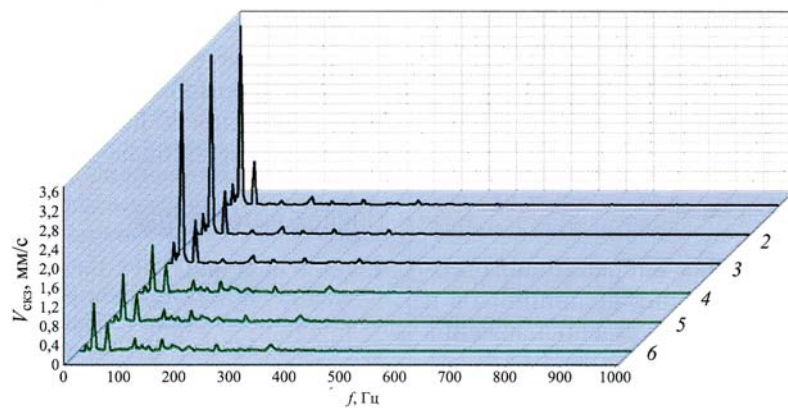


Рис. 10. Каскады спектров виброскорости остановленного насоса регулирования 4SE80D01 (место контроля и направление заданы точкой G01 на рис 2):
1 — 13.06.2013; 2 — 16.06.2013; 3 — 20.06.2013; 4 — 28.07.2013; 5 — 29.07.2013; 6 — 30.07.2013; 1 — 3 — насос смазки 4SC10D11 в работе; 4 — 6 — насос смазки 4SC10D11 остановлен

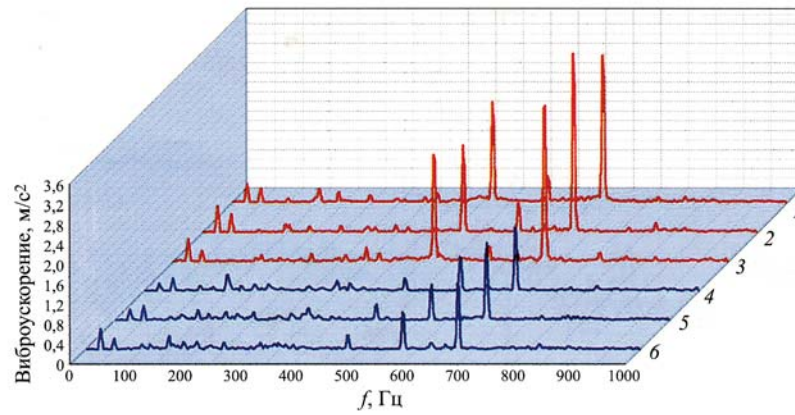


Рис. 11. Каскады спектров виброскорости работающего насоса регулирования 4SE80D01 на верхнем подшипнике (точка контроля G01 на рис 2): 1 — 28.05.2013; 2 — 03.06.2013; 3 — 10.06.2013; 4 — 06.07.2013; 5 — 15.07.2013; 6 — 22.07.2013; 1 — 3 — насос смазки 4SC10D11 в работе; 4 — 6 — насос смазки 4SC10D11 остановлен

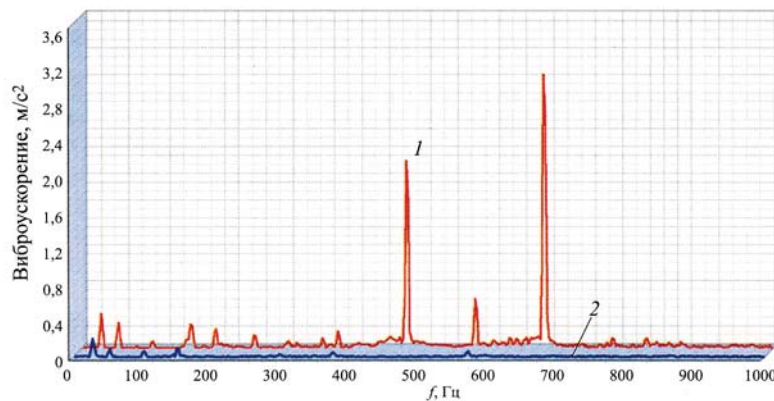


Рис. 12. Спектры виброскорости на работающем (1) и остановленном (2) насосе регулирования 4SE80D01 (точка контроля G01 на рис. 2)

Выводы

1. Проведена диагностика вибрационного состояния насосов масло снабжения подшипников и гидроподъёма, а также насосов маслоснабжения системы регулирования энергоблока № 4 Балаковской АЭС на основе базы данных, наработанной комплексом "РУБИН".

2. Анализ показал соответствие всех агрегатов нормам ПТЭ по СКЗ виброскорости, уровень которых менее 4,5 мм/с.

3. Для целей ранней диагностики представляется оправданным введение дополнительных границ по оценке вибрации:

- 1,5 мм/с - отлично;
- 3 мм/с - хорошо;
- 4,5 мм/с - удовлетворительно.

4. Непрерывный мониторинг позволил обнаружить связанность вибраций работающих насосов и наметить пути ослабления взаимного влияния.

Список литературы

1. ГОСТИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования.
2. ГОСТ Р 53565-2009. Контроль состояния и диагностики машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. М.: Стандартинформ, 2010.

ДИАМЕХ 2000

Вибродиагностика и Балансировка

Россия, 115432, г. Москва, 2-й Кожуховский проезд, 29, корп. 2, стр. 16

тел.: +7 (495) 223-0420
 факс: +7 (495) 223-0490
 diamech@diamech.ru

www.diamech.ru