

# ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ВИБРОСОСТОЯНИЯ ОСНОВНОГО РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Д. С. Синицын

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Предупреждение возникновения аварий на основном роторном оборудовании играет огромную роль в обеспечении безопасной эксплуатации энергоблока АЭС. В связи с этим предъявляются жесткие требования к вибродиагностике данного оборудования, что позволяет на ранней стадии выявить дефекты и прогнозировать дальнейшую работу жизненно важных элементов АЭС.

Большие габаритные размеры и массивные элементы основного роторного оборудования, представляющие собой сложную колебательную систему, требуют особо тщательно подходить к контролю вибросостояния, которое характеризует наличие дефектов, в составных частях оборудования. Появление повышенной вибрации приводит к значительным нагрузкам подвижных элементов конструкций и ускоряет их износ и старение. Контроль параметров вибрации насосных агрегатов усложняется большой вероятностью возникновения кавитационных эффектов, которые характеризуются гидравлическими ударами и могут быть причиной перегрузки измерительных каналов аппаратуры виброконтроля.

## Основное роторное оборудование энергоблока АЭС

К основному роторному оборудованию энергоблока АЭС относятся:

- турбогенератор (ТГ), в состав которого входят паровая конденсационная турбина и генератор переменного тока, монтируемые на общем фундаменте;
- питательные насосные агрегаты с электро(ПЭН) или турбоприводом (ТПН). ПЭН состоят из бустерного насоса, главного насоса и электродвигателя. В состав ТПН входят бустерный насос, главный насос и приводная паровая турбина с редуктором;
- главные циркуляционные насосные агрегаты (ГЦН), состоящие из вертикального, центробежного, одноступенчатого насоса и выносного электродвигателя;
- циркуляционные насосные агрегаты (ЦН), состоящие из осевого поворотного-лопастного вертикального или центробежного насоса и электродвигателя.

## Выбор вибропреобразователя

Для контроля параметров абсолютной вибрации в качестве первичных преобразователей применяют следующие вибропреобразователи:

– электродинамические вибропреобразователи, обладающие высокой помехозащищенностью, низким выходным сопротивлением, но вместе с тем ограниченным частотным диапазоном с достаточно большой нелинейностью АЧХ, сложной по реализации конструкцией и, как следствие, высокой ценой;

– зарядовые пьезоэлектрические вибропреобразователи получили широкое распространение по причине того, что имеют самые широкие диапазоны рабочих температур и частот, в общем случае, невысокую цену, но обладают низкой помехозащищенностью ввиду огромного выходного сопротивления, требуют применения усилителей заряда, расположенных в непосредственной близости. Увеличение помехозащищенности достигается путем применения экранирования, выставления особых требований по реализации цепей заземления, конструктивного обеспечения симметричности линий дифференциального выхода вибропреобразователя и входа усилителя заряда, что неизбежно приводит к многократному росту цены.

– пьезоэлектрические вибропреобразователи со встроенной электроникой являются компромиссным решением. Они обладают достаточно широким частотным диапазоном и небольшой неравномерностью АЧХ и, вместе с тем, невысоким выходным сопротивлением и достаточной помехоустойчивостью за счет того, что усилитель заряда размещается непосредственно в корпусе вибропреобразователя. Поскольку технология их изготовления и схемотехнические решения реализации встроенных усилителей достаточно хорошо отработаны, то стоимость данных вибропреобразователей практически не отличается от стоимости доступных зарядовых вибропреобразователей. К недостаткам пьезоэлектрических преобразователей со встроенной электроникой следует отнести ограниченный диапазон рабочих температур, который определяется максимальной рабочей температурой компонентов, применяемых в схеме встроенного усилителя – как правило, он ограничен величиной 125 °С, но у некоторых производителей есть исполнения до 163 °С. Кроме того, следует отметить, что пьезоэлектрические преобразователи со встроенной электроникой имеют меньший динамический диапазон, чем зарядовые преобразователи, обусловленный наличием собственных шумов встроенного усилителя, что в большинстве случаев не накладывает ограничения по их применению.

В ходе проведения работ по выбору оптимального построения измерительного канала абсолютной вибрации для использования на основном роторном оборудовании энергоблока АЭС в качестве предварительных оценочных испытаний на обеспечение требованиям электромагнитной совместимости были проведены испытания на воздействие статического электричества. Испытаниям были подвергнуты:

- зарядовые вибропреобразователи АР62 (ООО «Глобалтест»), 8324 («Брюль и Кьер») с усилителями заряда 2661 («Брюль и Кьер») и встроенный в измерительный преобразователь ИВА-И (собственного производства);

- пьезоэлектрический вибропреобразователь со встроенной электроникой АР36-100-01 (ООО «Глобалтест»), НТ624А01 («РСВ Piezotronics»).

По результатам проведенных испытаний устойчивыми к воздействию статического электричества (до 16 кВ при воздушном разряде и 8 кВ – контактом) с критерием функционирования «А» признаны измерительные каналы на основе вибропреобразователя АР36-100-01 и комплекта из вибропреобразователя 8324 с усилителями заряда 2661 («Брюль и Кьер»). На функционирование измерительного канала на основе вибропреобразователя НТ624А01 воздействие статического электричества оказывало незначительное влияние и при дополнительном экранировании соединительного кабеля его удавалось исключить.

Сочетание зарядовых преобразователей производства ООО «Глобалтест», усилителя заряда собственного производства и аппаратуры «Брюль и Кьер» не позволяло получить устойчивый к воздействию статического электричества измерительный канал, кроме полной реализации канала на оборудовании «Брюль и Кьер», что объясняется специальными мерами экранирования и обеспечением симметричности сигнальных цепей как в вибропреобразователе, так и в усилителе заряда. Следует отметить, что стоимость комплекта вибропреобразователя 8324 с усилителем заряда 2661 составляет порядка 4000 долларов, что на порядок превосходит стоимость вибропреобразователя АР36.

Для определения реальных уровней вибрации на конструктивных элементах роторного оборудования энергоблоков АЭС были проведены виброобследования с применением измерительного оборудования, имеющего частотный диапазон до 30 кГц (вибропреобразователь АР2030 и портативный анализатор спектра ультразвукового диапазона ZetlabA19-U2). Верхняя граничная частота выбрана из условий, что большинство промышленных пьезоэлектрических вибропреобразователей имеют резонансные частоты в полосе до 30 кГц.

По результатам проведенного виброобследования турбогенератора энергоблока №2 Ростовской АЭС в режиме работы в сеть при загрузке 100 % уровни виброскорости на опорах турбины находятся в пределах 1–3 мм/с, основная мощность вибрации сосредоточена на основной оборотной гармонике, распределение по высшим оборотным гармоникам – практически экспоненциальное, с ростом номера гармоники уровень виброскорости падает. На опорах генератора возбудителя уровень виброскорости на 3-ей оборотной гармонике несколько больше по сравнению с вибрацией на опорах турбины и составляет до 30 % от значения на оборотной гармонике, что обусловлено влиянием числа полюсов генератора. Максимальная амплитуда виброускорения на опорах турбогенератора не превышает 5 г в обследуемом частотном диапазоне.

При обследовании турбогенераторов энергоблоков № 2, 4 Балаковской АЭС при работе в сеть при загрузке 100 % и одновременном включении насосов гидроподъема ротора (НГПР) было выявлено, что при включении НГПР на подшипниках 1, 2 и 8 появляется высокочастотная (18–20 кГц) составляющая вибрации большой амплитуды (до 20 г и выше) в точке измерения, расположенной на верхнем бугеле подшипника, вероятной причиной которой является неравномерность потока масла на выходе из подшипника при возросшем давлении. Характерные спектры виброскорости и виброускорения при выключенном и включенном НГПР приведены на рис. 1.

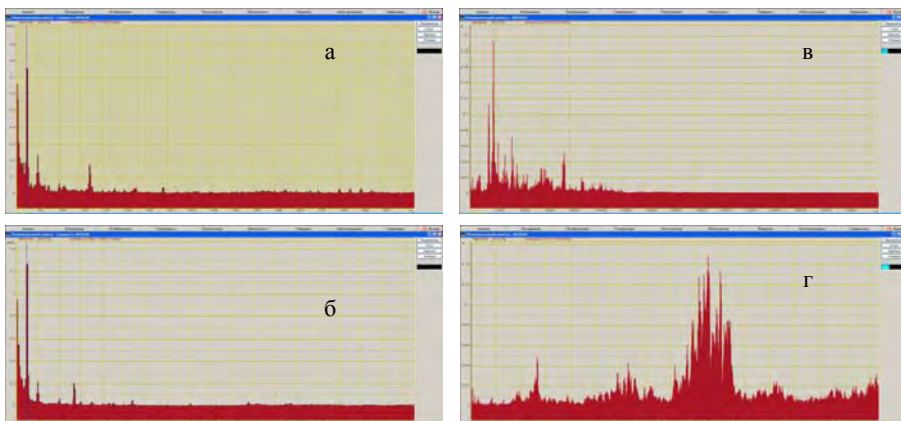


Рис. 1. Спектры виброскорости: а – при выключенном НГПР, б – при включенном НГПР. Спектры виброускорения: в – при выключенном НГПР, г – при включенном НГПР

По результатам проведенного виброобследования турбопитательных насосов энергоблока № 2 Ростовской АЭС спектр вибрации ТПН2 не содержит высокочастотных составляющих большой амплитуды, основная мощность сосредоточена в низкочастотной области. На 8-ом подшипнике ТПН1 выявлено наличие непостоянной во времени высокочастотной вибрации амплитудой до 50 g. Типовой вид спектра, усредненного за 10 с, и мгновенного сигнала виброускорения представлен на рис. 2. По другим опорам ТПН1 вибрация на 14 кГц также присутствует, но ее амплитудные значения не превышают 10 g. Наличие высокочастотных составляющих было обусловлено дефектом в подшипнике, выявленном при вскрытии опоры.

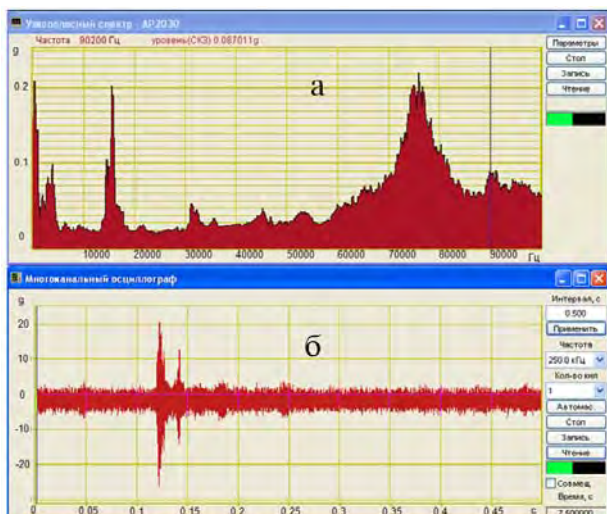


Рис. 2. Параметры вибрации на подшипнике 8 ТПН1: а – спектр виброускорения, б – осциллограмма виброускорения

При виброобследовании циркуляционных насосов энергоблока № 2 Ростовской АЭС было установлено, что на камерах рабочего колеса (КРК) насосов спектр вибрации не имеет ярко выраженных составляющих, непостоянен во времени, амплитудные значения виброускорения периодически достигают 200 g (высокочастотные всплески). Типовой вид спектра, усредненного за 10 с и мгновенного сигнала виброускорения на КРК ЦН представлен на рис. 3. На нижнем подшипнике насоса ЦН спектр вибрации аналогичен КРК, но с гораздо меньшими амплитудными значениями – до 40 g. В остальных точках измерения вибрации корпуса ЦН высокочастотной вибрации с большими амплитудными значениями не наблюдается. Причиной возникновения высокочастотных ударных нагрузок на камерах рабочего колеса насосов является возникновение кавитационных процессов. Следует отметить, что наличие кавитации в насосах способствует разрушению их элементов и производителями насосного оборудования предусматриваются меры по исключению эффекта кавитации, однако высокочастотная вибрация, обусловленная их наличием, не несет информации о состоянии подшипниковых узлов агрегата и не должна учитываться при контроле

параметров вибрации насосного агрегата. Контроль наличия и интенсивности кавитационных процессов в насосах может быть реализован в виде отдельного диагностического канала.

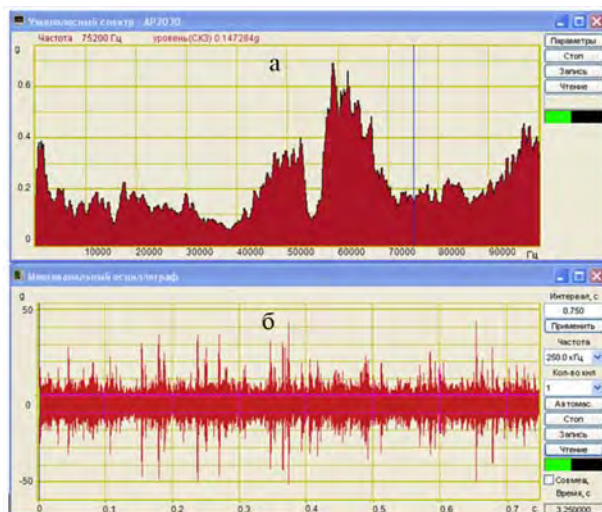


Рис. 3. Параметры вибрации на КРК ЦН3: а – спектр виброускорения, б – осциллограмма виброускорения

Контроль допустимых значений вибрации на конструктивных элементах оборудования (опорах валопроводов) регламентируется ГОСТ 2954, ГОСТ 10816, ГОСТ Р 55265.2 – контролю подлежит среднеквадратическое значение виброскорости в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц (от 2 до 1000 Гц – для оборудования с частотой вращения менее 600 об/мин). Наличие вибрации за пределами контролируемого частотного диапазона не должно оказывать влияния на результаты измерения контролируемой величины СКЗ виброскорости. Однако, вследствие того, что измерительные каналы имеют конечное значение амплитудного диапазона, воздействие на вибропреобразователь ускорений, имеющих большие значения амплитуд, могут приводить к ограничению сигнала в измерительном тракте и, следовательно, к искажению результатов измерения в полосе 10–1000 Гц.

Возможной причиной регистрации ложных завышенных результатов измерения вибрации на оборудовании может являться наличие высокочастотных составляющих виброускорения, имеющих амплитудные значения большие, чем амплитудный диапазон вибропреобразователей. Кроме того, высокочастотная вибрация может совпадать с резонансной частотой пьезоэлемента вибропреобразователя и, в данном случае, при воздействии вибрации амплитудой меньшей, чем амплитудный диапазон вибропреобразователя, возможно насыщение его усилителя. Наличие указанной составляющей вибрации зависит от режима работы оборудования и может быть следствием неравномерности потока смазки в подшипниковых узлах, а также возникновением кавитационных процессов в камерах рабочих колес насосов, о чем свидетельствует ее проявление в характерных точках измерения и непостоянство во времени. Экспериментальное

определение предельных значений уровней высокочастотной вибрации по результатам обследования вибросостояния затруднено, т.к. произвести измерения во всех режимах работы и заданном техническом состоянии оборудования практически невозможно.

### **Выбор типа вибропреобразователя и предъявляемые требования**

Очевидно, что с точки зрения стоимостных характеристик оборудования контроля вибрации и достижения необходимых требований по электромагнитной совместимости неоспоримыми преимуществами обладают пьезоэлектрические вибропреобразователи со встроенной электроникой.

Для исключения влияния воздействия высокочастотных составляющих вибрации, имеющих большие амплитудные значения виброускорения, при выборе вибропреобразователя необходимо предусмотреть достаточный запас по амплитудному диапазону. Но увеличивая амплитудный диапазон вибропреобразователя, получаем увеличение собственных шумов измерительного канала вследствие небольшого значения динамического диапазона пьезоэлектрических преобразователей со встроенной электроникой. Ограниченное значение динамического диапазона обусловлено наличием собственного шума встроенного усилителя, который в силу жестких ограничений по габаритным размерам имеет в своей основе простейшие схемотехнические решения.

Например, вибропреобразователь AP36-100-02 имеет амплитудный диапазон 25g и уровень СКЗ шума 0,0003 g, а у AP36-10-02 амплитудный диапазон 250 g, но и уровень СКЗ шума также на порядок выше 0,003 g. Ситуация усугубляется еще и тем, что контролю подлежит значение виброскорости в то время как выходным сигналом данных вибропреобразователей является виброускорение и, после интегрирования выходного сигнала вибропреобразователя получаем достаточно высокое значение собственных шумов виброскорости, т.к. интенсивность шумов обратно пропорциональна частоте. Так для измерительного канала, реализованного на AP36-100-02 уровень собственных шумов составляет менее 0,01 мм/с, на AP36-10-02 – уже до 0,07 мм/с, что при диапазоне измерения 20 мм/с позволяет достичь динамического диапазона измерения не более 30 дБ.

Исходя из изложенного выше, целесообразным является выбор вибропреобразователя и его адапта-

ция под задачи контроля вибрации конкретного оборудования. По результатам проведенных работ по контролю вибрации турбинного оборудования были выбраны вибропреобразователи AP36-30-02 (для обеспечения диапазона рабочих температур 125 °С) и AP36-30-03 (для обеспечения диапазона рабочих температур 150 °С), имеющие амплитудный диапазон 75 g. Фильтр низкой частоты встроенного усилителя с частотой среза 5 кГц обеспечивает практически полное подавление резонансного выброса на АЧХ вибропреобразователя.

Для контроля вибрации элементов насосного оборудования использование пьезоэлектрических акселерометров с встроенной электроникой крайне затруднительно ввиду наличия на элементах насосов виброускорений амплитудой до 200 g и необходимостью контроля вибрации от 2 Гц (для насосов частотой вращения менее 600 об/мин). По данной причине базовым вибропреобразователем, используемым для контроля вибрации насосного оборудования, нами был предложен пьезоэлектрический велосиметр AV04 – пьезоэлектрический преобразователь со встроенной электроникой, у которого встроенный усилитель реализован по схеме интегратора, причем интегрирование происходит в его первом каскаде, что обеспечивает устойчивость к воздействию виброускорения не менее 2000 g.

По результатам испытаний на электромагнитную совместимость схемы вибропреобразователей AP36 и AV04 доработаны установкой дополнительных фильтров, препятствующих прохождению электромагнитных импульсов, наведенных в выходных цепях вибропреобразователя на вход встроенного усилителя через емкость пьезокристалла, а также введением дополнительного экранирования в выходной кабель.

### **Выводы**

По результатам проведенных работ был оптимизирован состав вибропреобразователей для реализации измерительных каналов контроля параметров вибрации основного роторного оборудования энергоблока АЭС. Правильность принятых технических решений подтверждается отсутствием нареканий к работе данных вибропреобразователей в составе систем вибродиагностики на оборудовании энергоблоков Ростовской АЭС, Балаковской АЭС, Белоярской АЭС, Нововоронежской АЭС.