

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ СИСТЕМ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ПУСКА ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1200

В.И. Павелко*, М.Т. Слепов, В.У. Хайретдинов*****

* АО «НТЦ Дианпром»

109518, Москва, ул. Газгольдерная, 14

** Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1

*** АО ОКБ «Гидропресс»

142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21



Главной особенностью ввода в эксплуатацию АЭС в нашей стране и по отечественным проектам за рубежом является проведение большого объема измерений на различных стадиях пусконаладочных работ в отличие от иностранного опыта, где специалисты больше внимания уделяют расчетному обоснованию, а при вводе в эксплуатацию натурные испытания проводят в меньшем объеме. Использование при пусконаладочных работах различных измерительных систем требует привлечения большого количества персонала из разных организаций, часто не координирующих между собой работу по получению информации. Это приводит к многократному дублированию (монтажу, установке, наладке) как измерительных каналов, так и получаемой информации, что является одним из источников ее искажения, и существенному увеличению стоимости работ. В то же время большинство современных энергоблоков оснащается системами технической диагностики (СТД) [3, 4, 6, 10], состоящими из разнообразных измерительных каналов. Существующая практика ввода в эксплуатацию СТД предусматривала наладку и запуск систем только при достижении энергоблоком уровня мощности в 100%, что исключало их использование на этапе пусконаладочных работ и наборе мощности. Особенностью данной работы является попытка объединения разнородных локальных систем в единую информационную систему, позволяющую использовать максимальное количество штатных каналов одновременно с временно установленными для проведения пусконаладочных измерений каналами для получения достоверной и добротной информации о состоянии энергоблока.

Ключевые слова: ввод в эксплуатацию, виброконтроль, ВВЭР-1200, системы технической диагностики, система контроля вибрации, пусконаладочные измерения, переносной анализатор, акустические стоячие волны, собственные частоты колебаний, функция когерентности, фазовые характеристики, колебания маятникового типа.

ВВЕДЕНИЕ

Ввод в эксплуатацию – важнейший этап жизненного цикла энергоблока нового поколения ВВЭР, от качества которого зависит надежность, безопасность и экономичность

© В.И. Павелко, М.Т. Слепов, В.У. Хайретдинов, 2016

последующей работы энергоблока АЭС. Главной особенностью ввода в эксплуатацию АЭС является применение метода натурального экспериментального обоснования. Данный метод заключается в проведении широкого спектра натуральных измерений, включающих в себя как индивидуальные, так и комплексные испытания разнообразного оборудования и систем [11]. При этом затрачиваются значительные материальные, финансовые и трудовые ресурсы, а также ресурсы оборудования, так как, в основном, испытания проводятся в переходных и динамических режимах, редко происходящих при обычной эксплуатации, но вызывающих известные потери ресурса. В этой связи необходимо максимально эффективно использовать весь потенциал технических средств, применяемых в натуральных измерениях.

В качестве одного из возможных путей повышения эффективности натуральных испытаний и, как следствие, снижения прямых затрат на проведение пусконаладочных работ, а также первичной настройки систем технического диагностирования может служить концепция совмещения разнородных измерительных систем при проведении комплексных измерений. Под термином «разнородные системы» следует понимать измерительные системы, разные по функциям, типам измерительных каналов, штатные или смонтированные специально для проведения пусконаладочных работ и т.д. До настоящего времени все пусконаладочные измерения проводились без введенных в эксплуатацию систем технического диагностирования, что является препятствием успешному функционированию систем данного класса [1]. Синхронная многоканальная запись сигналов с совмещением систем из состава комплекса систем пусконаладочных измерений (СПНИ), системы контроля вибрации (СКВ) и системы технической диагностики ГЦНА (СТД ГЦНА), одна из которых временная (СПНИ) и предназначена для выведения нового блока АЭС на проектные параметры, а другие (СКВ и СТД ГЦНА) предназначены для длительного диагностирования в процессе промышленной эксплуатации этого блока, позволяет идентифицировать собственные и вынужденные колебания новой реакторной установки (РУ) ВВЭР-1200, отличающейся от РУ ВВЭР-1000 массогабаритными характеристиками и, как следствие, имеющей иные параметры собственных колебаний.

МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Вся работа по планированию, проведению и первичной обработке результатов комплексных измерений была выполнена в инициативном порядке персоналом Нововоронежской АЭС (НВАЭС), АО «НТЦ Диапром» (АО НТЦД) и АО ОКБ «Гидропресс» (АО ОКБ «ГП») для получения максимально полной информации о вибрационном состоянии РУ.

Комплекс систем пусконаладочных измерений (СПНИ)

СПНИ является средством подтверждения соответствия проектных решений реальным условиям работы энергоблока. Использование различных подсистем комплекса СПНИ позволяет извлечь максимальное количество первичной информации о реальном состоянии оборудования (вибрация, температура, пульсации давления, напряжения и т.д.), которую в условиях промышленной эксплуатации энергоблока получить будет невозможно.

Объем и состав комплекса СПНИ для проекта В-392М структурно аналогичны СПНИ на серийных блоках АЭС с ВВЭР-1000 и, в основном, соответствует решениям, реализованным в проектах В-320, В-428 и В-412 [5]. Испытания с использованием комплекса СПНИ в период циркуляционной промывки и обкатки, а также на этапах физического пуска, энергетического пуска и освоения проектной мощности энергоблока АЭС-2006 с реактором типа ВВЭР-1200 реализуются подсистемами контроля

- характеристик вибрационной нагруженности внутрикорпусных устройств реактора;
- вибрационных характеристик имитаторов тепловыделяющих сборок реактора;
- виброшумов реактора;

- теплогидравлических характеристик реактора и первого контура;
- теплогидравлических характеристик верхнего блока и шахтного объема;
- температур и напряжений элементов оборудования РУ;
- пульсаций давления, перемещения и вибраций элементов оборудования РУ;
- термомеханической нагруженности оборудования системы пассивного отвода тепла;
- усилий перемещения органов регулирования системы управления;
- гидравлических характеристик системы аварийного газоудаления;
- повысотного положения головок реперных тепловыделяющих сборок;

а также подсистемой сейсмоиспытаний оборудования главного циркуляционного контура.

Как видно из приведенного списка подсистем, комплекс СПНИ охватывает своими измерительными каналами все оборудование РУ и решает основные задачи контроля вибродинамических характеристик оборудования, термомеханической нагруженности элементов главного циркуляционного контура (ГЦК) и системы пассивного отвода тепла (СПОТ), а также теплогидравлических характеристик оборудования РУ.

Для совместных комплексных измерений были отобраны три подсистемы (первая, вторая и седьмая) из указанного списка.

Система контроля вибрации (СКВ)

С 2003 г. новые блоки АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 оснащаются СКВ, которые включены в проект реакторной установки. СКВ позволяет выявлять на ранней стадии и прогнозировать динамику различных аномалий в состоянии РУ. По сравнению с другими подобными системами диагностики СКВ имеет существенные особенности. Это, в первую очередь, относится к шумовым компонентам сигналов датчиков различной физической природы. Более подробно состав самой СКВ, а также типы измерительных каналов для СКВ серийного энергоблока ВВЭР-1000 изложены в [2].

В комплексных измерениях были задействованы только два из пяти типов измерительных каналов СКВ: акселерометры, установленные на верхнем блоке РУ (по главным осям), и акселерометры, смонтированные на «холодной нитке» каждой петли (U-образный гиб, а также между корпусом РУ и ГЦНА). Применение нейтронно-шумовых каналов СКВ в совместных измерениях запланировано на этапе освоения мощности.

СКВ из состава системы контроля, управления и диагностики (СКУД) проекта РУ ВВЭР-1200 имеет важное отличие, а именно, отсутствие каналов измерения пульсаций давления, которые в свою очередь обуславливают частотный состав и амплитуду вибрации внутрикорпусных устройств (ВКУ).

Особо отметим, что СКВ вводилась в эксплуатацию в опережающем порядке для использования в комплексных измерениях по сравнению с другими пусковыми блоками, где мероприятия по вводу систем технической диагностики начинали реализовываться только после достижения 100%-го уровня мощности.

Система технической диагностики главных циркуляционных агрегатов (СТД ГЦНА)

СТД ГЦНА является автоматизированной системой технического диагностирования, предназначенной для определения состояния главных циркуляционных агрегатов РУ по данным контроля теплотехнических и вибрационных параметров, выдачи диагностических сообщений о состоянии ГЦНА и формирования сигналов о превышении вибрации выше заданных уровней. Исходными данными для работы системы являются измеренные вибрационные параметры и параметры теплотехнического контроля (ТТК) ГЦНА. Параметры ТТК поступают из системы верхнего блочного уровня (СВБУ), а сигналы от датчиков вибрации через согласующие устройства и кабельные линии связи поступают в систему, где происходит их дальнейшая обработка для выявления диагностических признаков изменения технического состояния ГЦНА.

Функция контроля состояния ГЦНА и формирование предупредительной сигнализа-

ции заключаются в сравнении текущих среднеквадратических значений (СКЗ) виброскорости по каждому каналу измерения абсолютной вибрации с заданными уровнями. Более подробные сведения о системе можно получить из источника [9].

ОБЪЕДИНЕНИЕ ПОДСИСТЕМ В ЕДИНОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Детальный анализ конструктивных особенностей, отобранных для комплексных измерений систем, показал, что все системы построены по модульному принципу и имеют в своем составе стандартные разъемы для вывода сигнала на внешние регистрирующие устройства (тип BNC) по каждому измерительному каналу, но не имеют технических средств для ввода дополнительных параметров. Для построения совмещенной измерительной системы предполагалось выбрать одну систему в качестве ведущей и на основе ее возможностей (свободные или резервные измерительные каналы) организовать прием информации от других систем. Однако заложенные в нее разработчиком возможности предусматривали при модернизации систем расширить количество измерительных каналов всего на 10–15% от исходного. Таким образом, возможность совмещения систем с использованием только штатных возможностей ограничивало количество доступных измерительных каналов с других систем. Поэтому было принято решение об использовании внешнего универсального интегрирующего устройства.

Специалистами НВАЭС был разработан вариант с использованием переносного анализатора в качестве универсального интегрирующего устройства для всех трех систем, участвующих в комплексных измерениях. Переносными анализаторами был укомплектован отдел технической диагностики (ОТД) для проведения вибрационных измерений на турбогенераторах. В качестве анализатора использовался 40-канальный прибор LMS SCADAS Mobile – универсальный мобильный анализатор для измерения и анализа сигналов динамических процессов, совместимый практически с любым типом датчиков: акселерометрами, мостовыми датчиками, микрофонами, датчиками оборотов и термометрами. Он может работать с ПК или ноутбуком через Ethernet-интерфейс, через беспроводной интерфейс или как автономный регистратор. Управление анализатором выполняется с помощью ПО LMS Test.Xpress, имеющего функции программирования усилителей, калибровки каналов, настройки параметров измерений, управления процессом измерений и анализа данных. Схема объединения систем на основе анализатора представлена на рис. 1.

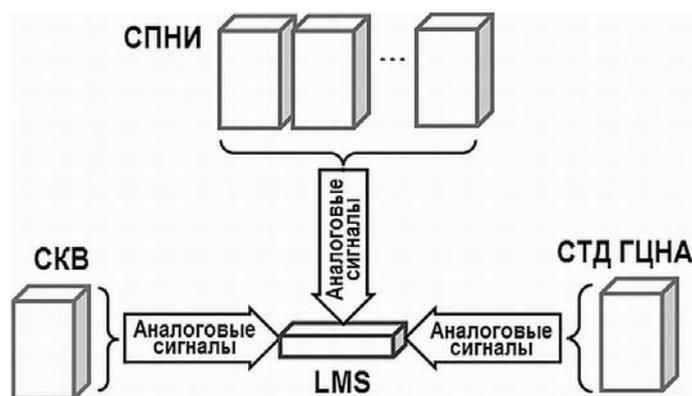


Рис.1. Объединение систем на основе анализатора LMS

Гибкость в использовании LMS SCADAS Mobile помимо универсальности в типах подключаемых измерительных каналов заключается в том, что при необходимости два или более однотипных приборов можно объединить в единый комплекс, создав тем самым распределенную регистрирующую систему, что является весьма эффективным решением

ем в условиях действующей АЭС. Собранные одним анализатором (ведомым) по своим измерительным каналам информация обрабатывается, фильтруется и оцифровывается и по одному оптоволоконному кабелю передается на другой прибор (ведущий), проводящий регистрацию своих сигналов, где и происходит строгая синхронизация измеренных сигналов с последующей записью в единый файл.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В период с 09.11.2015 по 09.12.2015 гг. во время циркуляционной промывки и обкатки было проведено 57 комплексных измерений при параметрах первого контура энергоблока от $T_{1К} = 116^{\circ}\text{C}$ и $P_{1К} = 4,0$ МПа до $T_{1К} = 286^{\circ}\text{C}$ и $P_{1К} = 16,4$ МПа.

В настоящее время не все полученные данные обработаны и поэтому представлены только первые, самые общие результаты. Например, на рис. 2 – 5 можно видеть семейства функций когерентности, охватывающие всевозможные взаимосвязи между парами задействованных в измерениях датчиков одной петли. Как видно из рисунков, функции когерентности могут иметь очень высокие значения (близкие к 1,0). Это свидетельствует как о большой взаимосвязи между сигналами пар датчиков, так и о качестве самой распределенной комплексной системы (ДПД в составе СПНИ, акселерометры – в СКВ).

Основным источником, обуславливающим вибрационное возбуждение ГЦК и корпуса РУ, являются акустические стоячие волны (АСВ). Именно на частотах АСВ достигаются максимальные значения соответствующих функций когерентности [1, 2], а не на других частотах собственных и вынужденных колебаний элементов ГЦК и корпуса РУ. Далее эта особенность АСВ будет рассмотрена на примере РУ ВВЭР-1200.

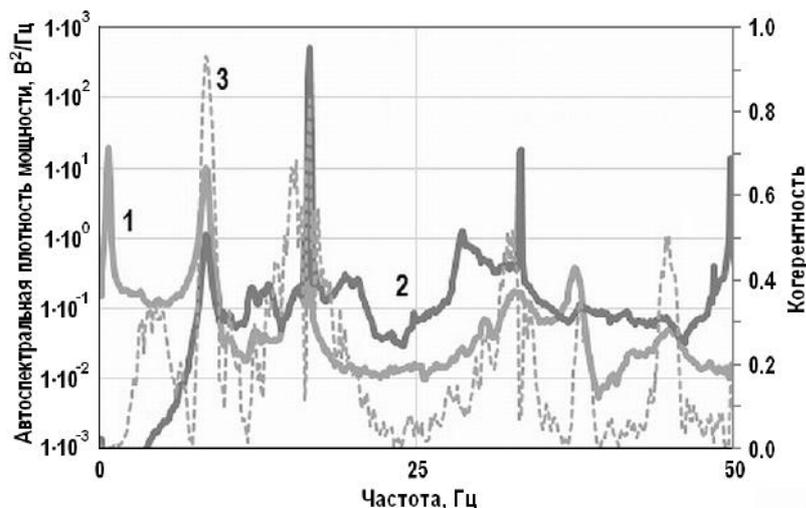


Рис. 2. Спектры ДПД (1), акселерометра ГЦНА (2) и их функция когерентности (3)

Исследование акустических стоячих волн

Природа возникновения и специфика акустических стоячих волн (АСВ) как главного источника возмущения колебаний внутрикорпусных устройств (ВКУ), корпуса РУ и ГЦК подробно описаны в [1, 2]. Информацию о резонансах АСВ, главным образом, извлекают из сигналов датчиков пульсации давления (ДПД). До настоящего времени ДПД оснащались все поставляемые на энергоблоки СКВ. Датчик для работы должен иметь прямой контакт с теплоносителем первого контура (прямая врезка в контур для ВВЭР-440 и размещение на импульсных трубках для ВВЭР-1000), что усложняет процедуру технического обслуживания данных каналов и налагает дополнительные требования к самому оборудованию. Поэтому АО НТЦД было принято решение использовать для описания свойств АСВ виброакселерометры, размещенные на ГЦК, а ДПД из поставки для ВВЭР-1200 исключить.

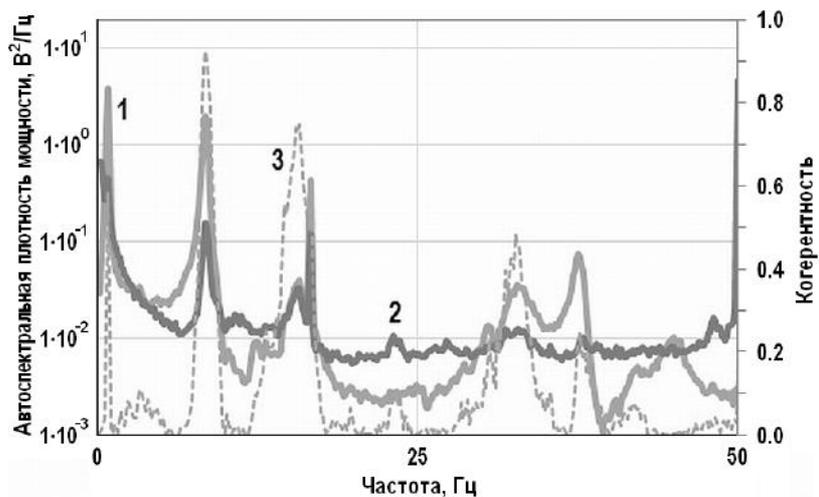


Рис. 3. Спектры ДПД на «холодной нитке» (1), ДПД на «горячей нитке» (2) и их функция когерентности (3)

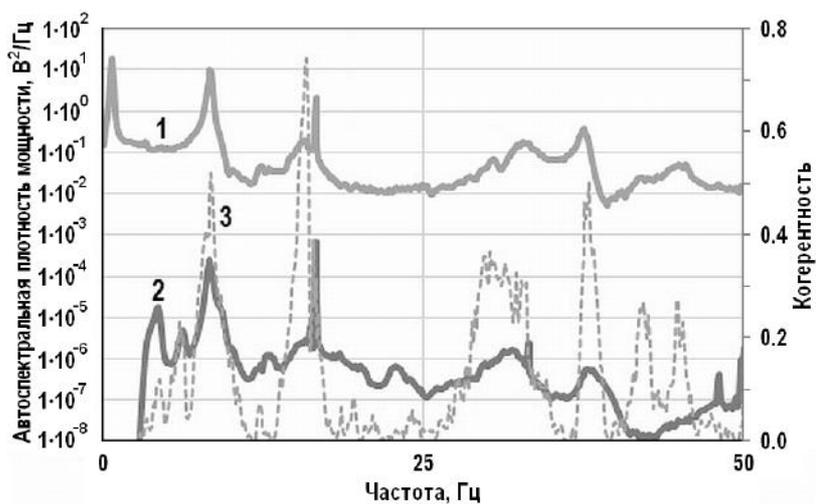


Рис. 4. Спектры ДПД (1), акселерометра верхнего блока (2) и их функция когерентности (3)

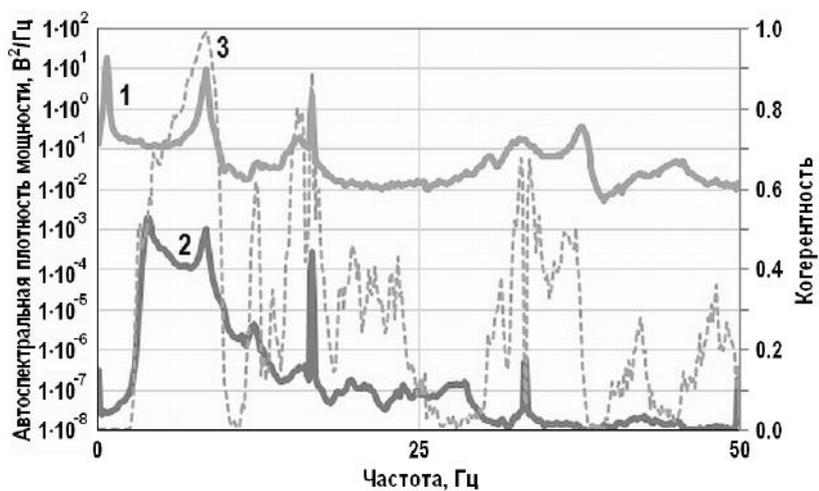


Рис. 5. Спектры ДПД (1), акселерометра петли (2) и их функция когерентности (3)

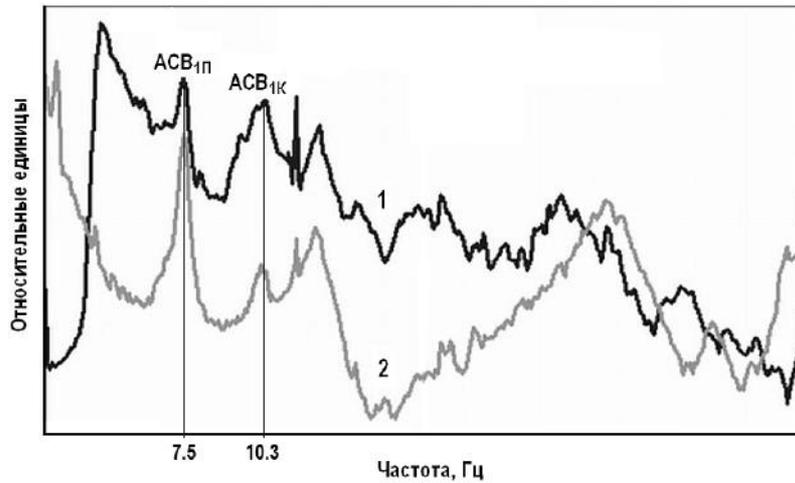


Рис. 6. Типичные автоспектры ДПД и акселерометра на «холодной нитке»: 1 – акселерометр; 2 – ДПД

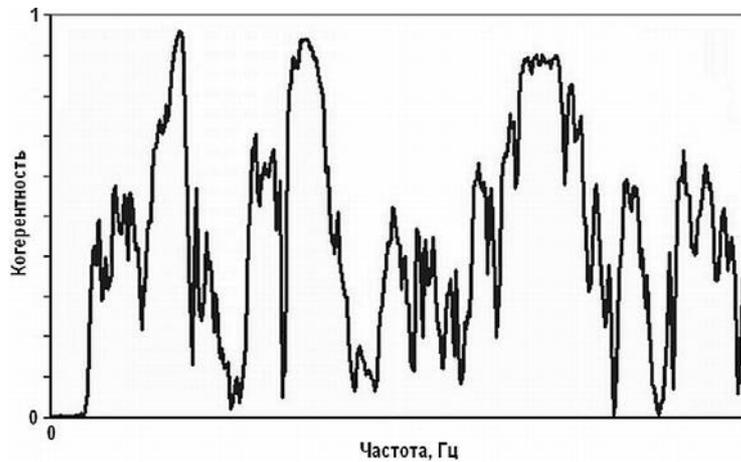


Рис. 7. Функция когерентности ДПД и акселерометра

На рисунке 6 представлены типичные автоспектры сигналов акселерометров СКВ и ДПД СПНИ, размещенных на «холодной нитке». Как видно из рисунка, основные резонансы формируются АСВ – это первая петлевая АСВ_{1п} с частотой $f \sim 7$ Гц и первая корпусная АСВ_{1к} с частотой $f \sim 10$ Гц. Они имеют ярко выраженные резонансы на соответствующих областях в авто- и взаимных спектральных оценках сигналов и ДПД, и акселерометров. На рисунке 7 показан качественный вид частотной зависимости функции когерентности [8], достигающей значений $\sim 0,9$ на частотах $f(ACB_{1п})$ и $f(ACB_{1к})$, что говорит о высокой степени связи между сигналами ДПД и акселерометров. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности замены уникальных ДПД технологичными акселерометрами.

По измеренным сигналам ДПД в диапазоне температур $T_{1к}$ от 116 до 286°С была получена практически линейная зависимость частоты АСВ_{1п} от температуры теплоносителя первого контура:

$$f(ACB_{1п}) = 12,2 - 0,0175 \cdot T_{1к}. \quad (1)$$

Из источника [1] известно, что АСВ_{1п} от температуры теплоносителя первого контура для серийного ВВЭР-1000 описывается близкой линейной зависимостью:

$$f(ACB_{1п}) = 11,36 - 0,0160 \cdot T_{1к}. \quad (2)$$

Тем не менее, частоты АСВ_{1п} ВВЭР-1000 систематически меньше на всем температурном диапазоне ТН до 330 °С, чем в ВВЭР-1200, т.е. эквивалентные акустические пути образования АСВ меньше у ВВЭР-1200, чем у ВВЭР-1000. Тот же вывод можно сделать и для АСВ_{1к}. Экспериментальные результаты по изменению частот вынуждающих сил и частот собственных колебаний необходимо учитывать в дальнейшем при оценке реальной вибронегруженности элементов ГЦК.

Колебания корпуса РУ

Основным источником колебаний корпуса являются АСВ, которые легко обнаруживаются в спектрах акселерометров на верхнем блоке, а также в различных функциях когерентности «ДПД-акселерометр» с высоким значением до 0,9. На частотах АСВ фазовые характеристики между сигналами соседних акселерометров на верхнем блоке РУ принимают только характерные значения 0° и (или) 180°, что свидетельствует об однонаправленных маятниковых колебаниях корпуса РУ. Вертикальная плоскость, в которой происходят данные маятниковые колебания корпуса, расположена между осями «I – III» и «II – IV». Из многолетней статистики виброконтроля корпусов РУ ВВЭР-1000 средствами СКВ [1, 2] следует, что такой тип колебаний ранее не наблюдался.

Непосредственной калибровкой измерительных каналов СКВ в ходе ПНИ персонал отдела технической диагностики (ОТД) НВАЭС показал, что размах колебаний данного типа незначителен и составляет величину не более 5 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана эффективность оперативного объединения информационных систем в различных их сочетаниях через внешний интегрирующий прибор для получения дополнительной информации о состоянии энергоблока.
2. Доказана возможность использования акселерометров для регистрации акустических стоячих волн в первом контуре РУ вместо датчиков пульсации давления.
3. Получены зависимости центральных частот АСВ от температуры ТН первого контура.
4. Выявлены однонаправленные «маятниковые колебания» корпуса РУ с размахом не более 5 мкм.

Литература

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР/ Под ред. А.А. Абагана. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
2. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
3. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
4. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 13 с.
5. Малышев Р.Ю., Хайретдинов В.У. Особенности контроля термомеханической нагруженности оборудования РУ при вводе в эксплуатацию энергоблока №4 Калининской АЭС. / Материалы конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР, ОКБ «Гидропресс», Подольск, 28 – 31 мая 2013 г.
6. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики. – М.: Энергоиздат, 1981. – 460 с.
7. Протокол № 9/04-03-02/24-Пр совещания по теме «Диагностирование термомеханического оборудования и реакторных установок АЭС». – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 28.12.2015.
8. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.
9. Система технического диагностирования главных циркуляционных насосных агрегатов СТД ГЦНА-1391: [электронный ресурс] / Справочник средств измерений. Доступно на сайте <http://www.all-pribors.ru/opisanie/56440-14-std-gtsna-1391-60256> (Дата обра-

щения: 05.04.2016).

10. *Мозгалеvский А.В., Пархоменко П.П., Согомонян Е.С.* Техническая диагностика. Справочник. Т. 9: Надежность и эффективность в технике. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
11. *Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д.* Эксплуатационные режимы ВВЭР – М.: Атомиздат, 1988. – 359 с.
12. *Thie J.* Reactor noise. – New York, 1963.
13. Advances in safety related diagnostics and early failure detection systems: Report of a technical committee meeting organized by the IAEA and held in Vienna, IAEA-J4-TC698, November 20-24, 1995.
14. *Albrecht R., Seifritz W.* The information in neutron fluctuations. // Nuclear Science and Engineering, – 1970. – Vol. 41. – PP. 417-420.
15. *Thie J.A.* Reactor noise monitoring for malfunctions. // Reactor Technology, 1971. – Vol.14. – No. 4. – PP. 354-365.
16. *Seifritz W., Stegemann D.* Reactor noise analysis. // Atomic Energy Review, 1971. – Vol.9. – No. 1. – PP. 129-135.
17. *Uhrig R.E.* Noise analysis in power reactor. // Electrical World, 1973. – Vol. 180, – No. 11. – PP. 44-56.
18. *Williams M.M.R.* Random Processes in Nuclear Reactors. – Pergamon Press. Ltd. Oxford England. 1974.
19. *Saito K.* On the theory of power reactor noise (I, II, III). // Ann. of Nucl. Sci. and Eng., 1974. – Vol. 1. – PP. 3-253.
20. *Saito K.* Source papers in reactor noise. // Progress in Nuclear Energy, 1979. – Vol. 3. – PP. 157-168.
21. *Bernard P., Brillon A., Carre J.C.* Neutron noise measurements of PWR's. // Progress in Nuclear Energy, 1977. – Vol. 1. – PP.333-346.

Поступила в редакцию 16.05.2016 г.

Авторы

Павелко Владимир Ильич, заместитель генерального директора, канд. техн. наук
E-mail: diaprom@diaprom.com

Слепов Михаил Тимофеевич, начальник отдела, канд. техн. наук
E-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Хайретдинов Валерий Умярович, начальник отдела, канд. техн. наук
E-mail: khayretdinov@grpess.podolsk.ru

UDC 621.039.4

EXPERIENCE OF CARRYING OUT COMPREHENSIVE MEASUREMENTS USING HETEROGENEOUS SYSTEMS AT VARIOUS STAGES OF THE VVER-1200 POWER UNIT COMMISSIONING FOR OPERATION

Pavelko V.I. *, Slepov M.T. **, Khayretdinov V.U. ***

* JSC «NTTS Diaprom»

14 Gasholdernaya str., Moscow, 109518 Russia

** Branch of JSC «Concern Rosenergoatom», Novovoronezh NPP

1 Industrial zone South, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072 Russia

*** JSC OKB «Gidropress»

21 Ordzhonikidze str., Podolsk, Moscow reg., 142103 Russia

ABSTRACT

The main feature distinguishing commissioning as refers to nuclear power plants in Russia and Russian projects implemented abroad is the large number of measurements conducted during different phases of commissioning which is in contrast to the foreign experience where professionals focus more on the design rationale, and of full-scale testing is conducted at a smaller scale during the commissioning. Use of measuring systems for various purposes during commissioning requires involvement of large numbers of staff from different organizations, often not coordinating with each other their efforts aimed at the obtaining information. This results in the unwanted parallelism (mounting, installation, adjustment) both of measurement channels and of the information thus obtained, which ultimately serves as one of the sources of its distortion and results in the substantial increase of the cost of operations. At the same time, most modern power units are equipped with technical diagnostics systems (TDS) [3, 4, 6, 10] including in their composition measuring channels for various purposes. In pursuance with existing practice of TDS commissioning adjustment and start-up operation of diagnostic systems is allowed only when the power unit level reaches 100% which prevents the TDS use during the phases of start-up preparation operations and the unit power ascension. Distinguishing feature of the present study is the attempt to combine disparate local systems into a unified information system allowing use of the maximum number of standard channels simultaneously with dedicated measurement channels temporarily installed for the commissioning in order to obtain reliable and quality information about the status of the power unit.

Key words: commissioning, vibration control, VVER-1200, technical diagnostics system, vibration control system, commissioning measurement, portable analyzer, acoustic standing waves, natural frequencies, the coherence function, phase, oscillation of pendulum type.

REFERENCES

1. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibrating diagnostics of VVER. Ed.: A.A. Abagyan. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2004. 344 p. (in Russian).
2. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. Systems diagnosis of VVER. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2010. 391 p. (in Russian).
3. Birger I.A. Technical diagnostics. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p. (in Russian).
4. GOST 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions. Moscow. Publishing House of Standards, 1990. 13 p. (in Russian).
5. Malyshev R.Y., Khayretdinov V.U. Control Features of thermomechanical loading of reactor plant equipment during commissioning of power unit No. 4 of Kalinin NPP. In Proceedings of

- Conference «Safety Assurance of NPP with WWER», ОКБ «Gidropress», Podolsk, May 28 – 31. 2013 (in Russian).
6. Parkhomenko P.P., Soghomonyan E.S. Basics of technical diagnostics. Moscow. Energoizdat Publ., 1981. 460 p. (in Russian).
7. Minutes of the Meeting No. 9/04-03-02/24-PR «Diagnostics of mechanical equipment and the reactor installations of nuclear power plants». Moscow. JSC «Concern Rosenergoatom», 28.12.2015 (in Russian).
8. Sergienko A.B. Digital signal processing. Saint-Petersburg. Peter Publ., 2003. 604 p. (in Russian).
9. The system of technical diagnostics of the STD RCP-1391 main circulation pump units. Electronic resource. Handbook on measuring instrumentation. Available at <http://www.all-pribors.ru/opisanie/56440-14-std-gtsna-1391-60256> (reference date: 05.04.2016) (in Russian).
10. Mozgalevskaya V.A., Parkhomenko P.P., Soghomonyan E.S. Technical diagnostics: Reference book. Vol. 9: Reliability and efficiency in engineering. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1987. 240 p. (in Russian).
11. Ovchinnikov F.Y., Golubev L.I., Dobrynin V.D. The operational modes of VVER. Moscow. Atomizdat Publ., 1988. 359 p. (in Russian).
12. Thie J. Reactor noise. New York, 1963.
13. Advances in safety related diagnostics and early failure detection systems. Report of a technical committee meeting organized by the IAEA and held in Vienna, IAEA-J4-TC698, November 20-24, 1995.
14. Albrecht R., Seifritz W. The information in neutron fluctuations. *Nuclear Science and Engineering*, 1970, v. 41, pp. 417-420.
15. Thie J.A. Reactor noise monitoring for malfunctions. *Reactor Technology*, 1971, v. 14, no. 4, pp. 354-365.
16. Seifritz W., Stegemann D. Reactor noise analysis. *Atomic Energy Review*, 1971, v. 9, no. 1, pp. 129-135.
17. Uhric R.E. Noise analysis in power reactor. *Electrical World*, 1973, v. 180, no. 11, pp. 44-56.
18. Williams M.M.R. Random Processes in Nuclear Reactors. Pergamon Press. Ltd. Oxford, England. 1974.
19. Saito K. On the theory of power reactor noise (I, II, III). *Ann. of Nucl. Sci. and Eng.*, 1974, v. 1, pp. 3-253.
20. Saito K. Source papers in reactor noise. *Progress in Nuclear Energy*, 1979, v. 3, pp. 157-168.
21. Bernard P., Brillion A., Carre J.C. Neutron noise measurements of PWR's. *Progress in Nuclear Energy*, 1977, v. 1, pp. 333-346.

Authors

Pavelko Vladimir Ilyich, Deputy Director General, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: diaprom@diaprom.com

Slepov Mikhail Timofeevich, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Khayretdinov Valery Umyarovich, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: khayretdinov@grpress.podolsk.ru