

КОМПЛЕКСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА БЛОКЕ № 1 НВАЭС-2 В ПРОЦЕССЕ ОПЫТНО- ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.И. Федоров, М.Т. Слепов

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»
396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1*



Использование большого количества измерительных систем на этапе ввода в эксплуатацию реакторных установок является особенностью ввода в эксплуатацию АЭС в нашей стране и по отечественным проектам за рубежом в отличие от иностранного опыта, где специалисты больше внимания уделяют расчетному обоснованию, а при вводе в эксплуатацию натурные испытания проводят в меньшем объеме. Применение при пусконаладочных работах различных измерительных систем требует привлечения большого количества персонала из разных организаций, часто не координирующих между собой работы на различных стадиях пускового процесса, что в конечном итоге 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), состоящими из разнообразных измерительных каналов. Указанные проблемы удалось частично решить при вводе в эксплуатацию нового инновационного блока поколения 3+ на площадке Нововоронежской АЭС-2.

Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока №1 позволяет найти технические решения для реализации серии совместных измерений, на которых целесообразно остановиться более подробно в целях обобщения полученного опыта и распространения его на диагностические системы других АЭС.

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 энергоблока в эксплуатацию – это один из важнейших этапов его жизненного цикла, от качества которого зависят не только оптимальность и безопасность самого процесса ввода в эксплуатацию, но и надежность, безопасность и экономичность последующей работы АЭС. Главной особенностью ввода в эксплуатацию АЭС в нашей стране и по отечественным проектам за рубежом является применение метода натурального

© А.И. Федоров, М.Т. Слепов, 2017

экспериментального обоснования. Этот метод заключается в проведении широкого спектра натуральных измерений, включающих в себя как индивидуальные, так и комплексные испытания разнообразного оборудования и систем на различных стадиях пусконаладочных работ, в отличие от иностранного опыта, где специалисты больше внимания уделяют расчетному обоснованию, а при вводе в эксплуатацию натурные испытания проводятся в меньшем объеме [4, 13, 14].

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 циркуляционной промывки и обкатки энергоблока, вводимого в эксплуатацию. Под термином «разнородные системы» следует понимать измерительные системы, разные по функциям, типам измерительных каналов, штатные или смонтированные специально для проведения пуско-наладочных работ и т.п. До настоящего времени все пусконаладочные измерения проводились без введенных в эксплуатацию систем технического диагностирования, что является одной из причин не столь успешного функционирования систем данного класса [1 – 3]. В то же время на всех вводимых в эксплуатацию энергоблоках монтируются специализированные системы для отслеживания режимов оборудования на различных этапах циркуляционной промывки и обкатки. Комплекс систем, предназначенный для проведения измерений, носит название «система пусконаладочных испытаний» (СПНИ). 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) – 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 [4, 5].

МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Впервые за все время существования советской и российской атомной энергетики была проведена работа по объединению разнородных измерительных систем для получения максимально полной информации о вибрационном состоянии РУ. С этой целью в комплексных измерениях предполагалось использовать подсистемы из состава комплекса СПНИ, а также СКВ из состава комплекса систем контроля, управления и диагностики (СКУД) и СТД ГЦНА.

Рассмотрим системы, используемые в комплексных измерениях.

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 (рис. 1) и, в основном, соответствует решениям, реализованным в проектах В-320, В-428 и В-412 [6].

Комплекс СПНИ охватывает своими измерительными каналами все оборудование РУ и решает следующие основные задачи: контроль вибродинамических характеристик

оборудования, контроль термомеханической нагруженности элементов главного циркуляционного контура (ГЦК) и системы пассивного отвода тепла (СПОТ), а также контроль теплогидравлических характеристик оборудования РУ.

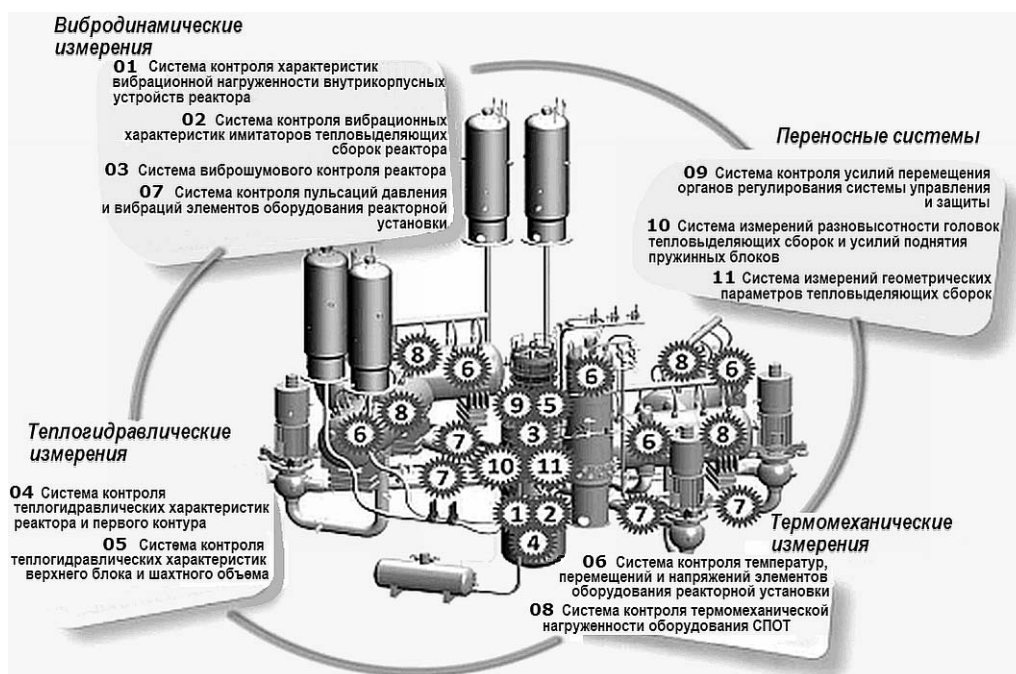


Рис. 1. Система пусконаладочных измерений

Система контроля вибрации (СКВ)

Для понимания дальнейшего совершим небольшой экскурс в историю оснащения АЭС различными СТД. Первоначально СТД на АЭС в современном представлении не существовало; не было даже инструментальных средств для сбора соответствующей информации, не говоря уже об оперативном отображении обработанной информации о состоянии оборудования. Процесс диагностирования держался часто на энтузиазме отдельных сотрудников. Если говорить о конкретике, то применительно к условиям Нововоронежской АЭС процесс диагностирования выглядел следующим образом (рассматриваются только вибрационные измерения). Виброакустические датчики устанавливались на контролируемом оборудовании (часто один датчик на один агрегат). Полученный сигнал усиливался, фильтровался и подавался на устройство, которое преобразовывало электрический сигнал в звук. Оператор мог по своему желанию, селективно выбирая нужный канал, прослушать работу каждой единицы оборудования. При этом дефект выявлялся «на слух». Понятно, что говорить в данном случае о точности или надежности выявляемых дефектов можно с крайней осторожностью. Позднее, с появлением первых, еще несовершенных, приборов для многоканальной записи сигналов (магнитографы), осуществляющих быстрое преобразование Фурье (основы спектрального анализа), стала возможной регистрация и обработка информации в лабораторных условиях. Конечно, ни о каком представлении информации в режиме «online» в данном случае не могло идти и речи [5].

Начиная 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 СКВ, а также типы измерительных каналов для СКВ серийного энергоблока ВВЭР-1000 изложены в [1]. На рисунке 2 представлен скриншот экранной формы СКВ с расположением датчиков [15].

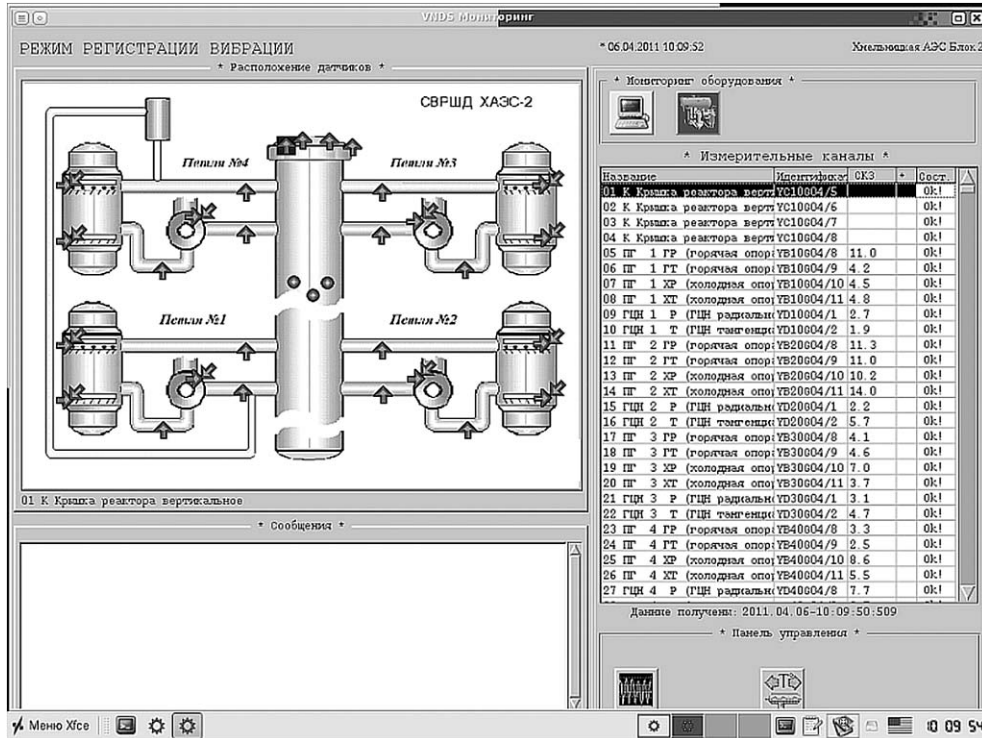


Рис. 2. Экранная форма СКВ с расположением датчиков

В комплексных измерениях были задействованы только два из пяти типов измерительных каналов СКВ – это акселерометры, установленные на верхнем блоке РУ (по главным осям), и акселерометры, смонтированные на «холодной нитке» каждой петли (U-образный гиб и между корпусом РУ и ГЦНА). Каналы, измеряющие флуктуации нейтронного потока (вне- и внутризонные), не использовались ввиду проведения измерений на этапе «холодной и горячей отмычки», т.е. с загруженной имитационной зоной. Датчики относительных перемещений были также исключены по причине ограниченности свободных каналов регистрирующего устройства.

СКВ из состава системы контроля, управления и диагностики (СКУД) проекта РУ ВВЭР-1200 имеет важное отличие, а именно, отсутствие каналов измерения пульсаций давления, которые обуславливают частотный состав и амплитуду вибрации внутрикорпусных устройств (ВКУ) [12].

Система технической диагностики главных циркуляционных агрегатов (СТД ГЦНА)

СТД ГЦНА является автоматизированной системой технического диагностирования, предназначенной для определения технического состояния главных циркуляционных агрегатов реакторной установки 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. На рисунке 3 представлено расположение датчиков ГЦНА системы STD ГЦНА.

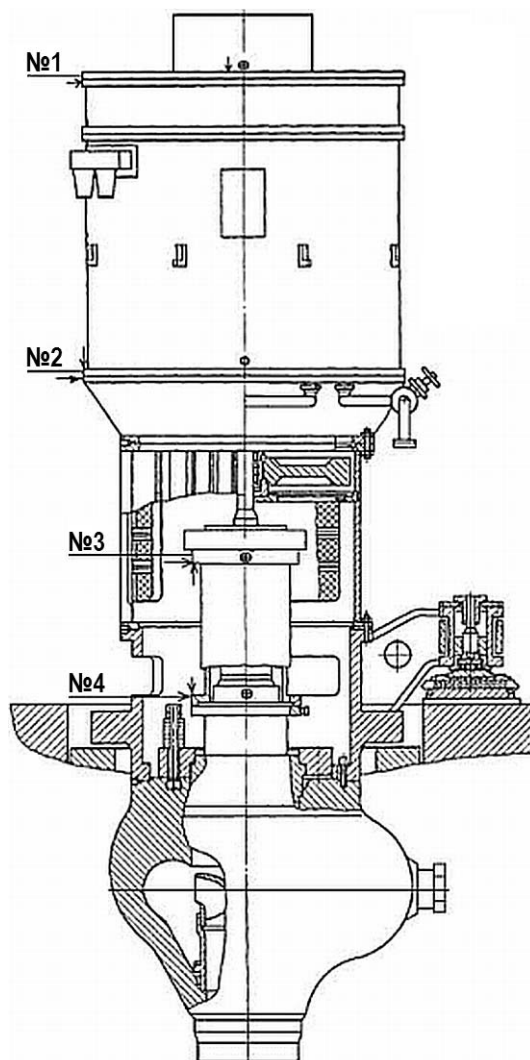


Рис. 3. ГЦНА с расположением датчиков STD ГЦНА

Функция контроля состояния ГЦНА и формирования предупредительной сигнализации предусматривает сравнение текущих среднеквадратических значений (СКЗ) виброскорости по каждому каналу измерения абсолютной вибрации с заданными уровнями (более подробные сведения о системе можно получить из источника [7]).

ОБЪЕДИНЕНИЕ ПОДСИСТЕМ В ЕДИНОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО

На основании [8] был проведен детальный анализ конструктивных особенностей, отобранных для комплексных измерений информационных систем, который 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 [11], но не имеют технических средств для ввода допол-

нительных параметров, так как создавались для решения конкретных задач. 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 с других систем. Однако заложенные разработчиком возможности предусматривали при модернизации систем расширить количество измерительных каналов всего на 10 – 15% от исходного. Таким образом, возможность совмещения систем, использующих только штатные возможности, ограничивала количество доступных к использованию измерительных каналов от других систем. Первоначально были разработаны и проанализированы два возможных варианта подключения систем.

Вариант 1. СПНИ в качестве ведущей системы

Построение объединенной системы представлено на рис. 4. Данный вариант обладает, по крайней мере, одним важным преимуществом, а именно, большинство сигналов, необходимых для комплексных измерений, предполагалось использовать из подсистем комплекса СПНИ; следовательно, отсутствовала необходимость в прокладке большого количества дополнительных кабельных линий.

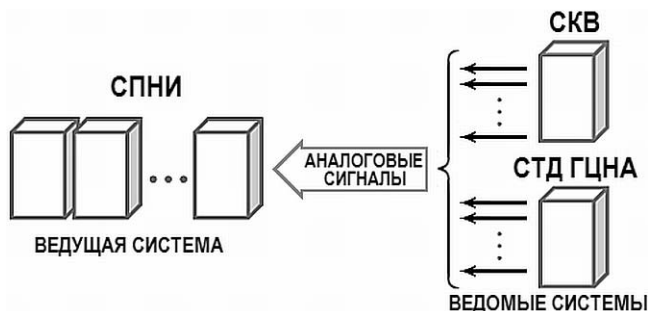


Рис. 4. Объединение систем на основе СПНИ

Кроме неоспоримого преимущества у предложенной схемы были выявлены и существенные недостатки – ввод новых сигналов требовал изменения как программных, так и технических средств СПНИ (отсутствие свободных каналов для ввода дополнительных сигналов от других систем), что автоматически вело к внесению изменений в проектную и поставочную документацию, а это было уже невозможно перед фазой циркуляционной промывки и обкатки [15].

Вариант 2. СКВ в качестве ведущей системы

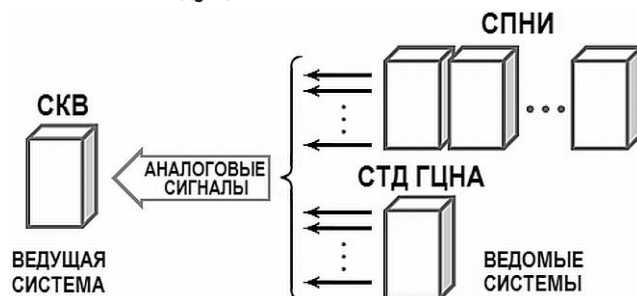


Рис. 5. Объединение систем на основе СКВ

Для исключения недостатков подключения по варианту 1 было предложено использовать резервные каналы СКВ для ввода дополнительных сигналов от других систем (схема объединенной системы представлена на рис. 5). При реализации предложенного варианта появлялась возможность использовать штатные средства СКВ для ввода дополнительных сигналов других систем, что не требовало внесения изменения в про-

граммные и технические средства СКВ и, следовательно, в уже разработанную проектную и поставочную документацию. Но при незначительном числе резервных каналов и необходимости прокладки большого количества кабельных линий (по сравнению с вариантом 1) данный подход осуществлен не был [16].

Вариант 3. Объединение систем на основе переносного анализатора

Учитывая трудности с реализацией совмещения систем по вариантам 1 и 2, персонал НВО АЭС разработал третий 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 термопарами. 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 показана на рис. 6.

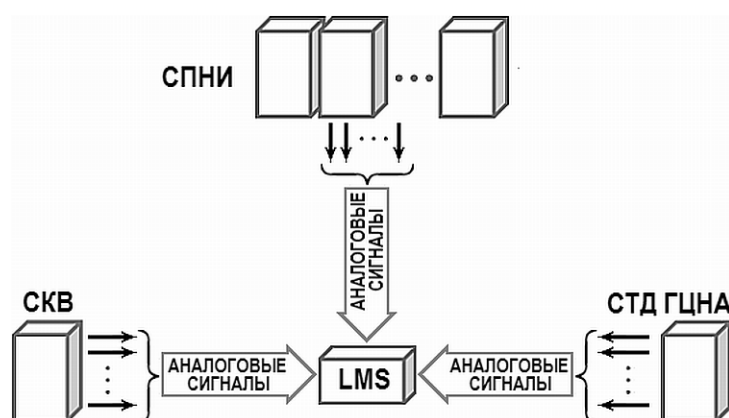


Рис. 6. Объединение систем на основе анализатора LMS

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 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 [17].

К сожалению, по независимым причинам (отсутствие необходимого программного обеспечения, дополнительных модулей) не удалось организовать связь между двумя анализаторами. Поэтому не удалось использовать в комплексных измерениях две из запланированных подсистем комплекса СПНИ – системы контроля характеристик вибрационной нагруженности внутрикорпусных устройств реактора и системы контроля вибрационных характеристик имитаторов тепловыделяющих сборок реактора. С учетом

важности полученных результатов при проведении циркуляционной промывки и обкатки шестого энергоблока НВОАЭС проведение комплексных измерений с полным составом систем запланировано и на седьмом энергоблоке согласно п. 7 источника [8].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В период с 9 ноября по 9 декабря 2015 г. во время циркуляционной промывки и обкатки было проведено 57 комплексных измерений при параметрах первого контура энергоблока от $T_{1к} = 116^{\circ}\text{C}$ и $P_{1к} = 4$ МПа до $T_{1к} = 282^{\circ}\text{C}$ и $P_{1к} = 16.4$ МПа [4] с различной дискретизацией исходных сигналов и временем записи [9 – 11]. Предложенная схема показала устойчивую работу на всех режимах. Дополнительно исследовался вопрос о регистрации событий ударного типа всеми имеющимися в распоряжении датчиками, для чего была реализована передача инициирующего сигнала от системы обнаружения свободных предметов (СОСП) [1, 2] в анализатор. Полученная схема позволила проводить регистрацию гидроударов, что практически не исследовалось на этапах ввода в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР [18, 19].

Гибкость предложенной схемы предоставила возможность организации постоянной записи временных реализаций с различных датчиков в течение 72-х часов, что было сделано впервые. При необходимости объем записи может быть увеличен как по времени, так и по составу измерительных каналов, поскольку в данном случае этот объем определяется только емкостью накопителя, подключенного к анализатору компьютера [20].

ВЫВОДЫ

1. Доказана возможность оперативного объединения различных информационных систем и в разных их сочетаниях через внешний интегрирующий прибор для получения полной информации о состоянии энергоблока.
2. Получены временные реализации ударных событий с использованием датчиков разного типа и различных систем по инициализирующему сигналу с СОСП [1, 2].
3. Доказана возможность использования акселерометров вместо датчиков пульсации давления [21, 22] для регистрации акустических стоячих волн в первом контуре РУ.
4. Выполнены сверхдлинные измерения с частой дискретизации 1024 Гц [9] в течение всего цикла разогрева реакторной установки от 0 до 100% тепловой мощности РУ ВВЭР-1200.

Литература

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
2. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР / Под ред. А.А. Абагяна. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
3. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 13 с.
4. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – №4. – С. 44-54.
5. Баранова Ю.А., Слепов М.Т. АЭС 2006 с энергоблоками ВВЭР-1200: новый подход к отображению информации от систем технической диагностики. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – №4. – С. 11-20.
6. Мальшев 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.

7. Система технического диагностирования главных циркуляционных насосных агрегатов СТД ГЦНА-1391 / Справочник средств измерений. [Электронный ресурс] Доступно на сайте http://www.all_pribors.ru/opisanie/56440_14_std_gtsna_1391_60256 (Дата обращения: 05.04.2016).
8. Протокол № 9/04-03-02/24-Пр совещания по теме «Диагностирование тепломеханического оборудования и реакторных установок АЭС». – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 28.12.2015.
9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.
10. Мозгалевский А.В., Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Техническая диагностика. Справочник. Т. 9: Надежность и эффективность в технике. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
11. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики. – М.: Энергоиздат, 1981 – 460 с.
12. Skomorohov A.O., Slepov M.T. Pattern recognition in APL with application to reactor diagnostics // APL Quote Quad. – 2000. – Vol. 29. – No. 3. – PP. 164-172.
13. Thie J.A. Reactor noise. – New York, 1963.
14. 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.
15. Albrecht R., Seifritz W. The information in neutron fluctuations. // Nuclear Science and Engineering. – 1970. – Vol. 41. – PP. 417-420.
16. Thie J.A. Reactor noise monitoring for malfunctions. // Reactor Technology, 1971. – Vol.14. – No. 4. – PP. 354-365.
17. Seifritz W., Stegemann D. Reactor noise analysis. // Atomic Energy Review. – 1971. – Vol. 9. – No. 1. – PP. 129-135.
18. Uhric R.E. Noise analysis in power reactor // Electrical World. – 1973. – Vol. 180, – No. 11. – PP. 44-56.
19. Williams M.M.R. Random Processes in Nuclear Reactors. – Pergamon Press. Ltd. Oxford England. 1974.
20. Saito K. On the theory of power reactor noise (I, II, III). // Ann. of Nucl. Sci. and Eng. – 1974. – Vol. 1. – PP. 3-253.
21. Saito K. Source papers in reactor noise. // Progress in Nuclear Energy. – 1979. – Vol. 3. – PP. 157-168.
22. 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 26.06.2017 г.

Авторы

Федоров Анатолий Иванович, главный инженер
E-mail: FedorovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

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

UDC 621.039.4

COMPREHENSIVE MEASUREMENT OF DIAGNOSTIC PARAMETERS OF EQUIPMENT AT THE POWER UNIT № 1 OF NOVovorONEZH NPP II IN THE PROCESS OF PILOT OPERATION

Fedorov A.I., Slepov M.T.

Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» «Novovoronezh Nuclear Power Plant»
1 Promyshlennaya zona Yuzhnaya, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072
Russia

ABSTRACT

The use of a large number of measuring systems at the stage of commissioning of reactor facilities is a feature of the commissioning of nuclear power plants in our country and on domestic projects abroad unlike foreign experience, where professionals focus more on design rationale, and the commissioning of full-scale tests carried out in smaller amounts [13, 14]. Application during commissioning, the various measuring systems requires the involvement of a large number of staff from different organizations, often not coordinating among themselves work at various stages of the start-up process that ultimately leads to multiple duplication (mounting, installation, commissioning) as measurement channels and the received information, which is one of the sources of distortion, and a substantial increase in the cost of work. At the same time, most modern units are equipped with systems of technical diagnostics (STD) [1 – 3], consisting of a variety of measuring channels. The above problems have been partially solved with the commissioning of the new innovative generation Unit 3+ at the site of Novovoronezh NPP. In [4] is briefly affected by technical decisions, allowed to perform a series of joint measurements on the power Unit № 1 of Novovoronezh NPP II (Unit № 6 in old classification), which should stop in more detail with the aim of collecting experience and replicate it at other nuclear power plants. 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 units.

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

REFERENCES

1. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. System diagnosis of VVER. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2010. 391 p. (in Russian).
2. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibration and noise diagnostics of VVER. Under the editorship of A.A. Abagyan. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2004. 344 p. (in Russian).
3. GOST 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions. Moscow. Publishing House of Standards, 1990. 13 p. (in Russian).
4. Pavelko V.I., Slepov M.T., Khairetdinov V.U. Experience of carrying out complex measurements with the use of different systems at different stages of the start-up of the VVER-1200. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016, no. 4, pp. 44-54. (in Russian).
5. Baranova A.Yu., Slepov M.T. AES 2006 VVER-1200 is a new approach to displaying information from the systems of technical diagnostics. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2014, no. 4, pp. 11-20 (in Russian).
6. Malyshev R.Y., Khairetdinov V.U. Peculiarities of control of the thermomechanical loading of reactor plant equipment during commissioning of power unit No. 4 of Kalinin NPP. The

materials of the conference «Safety Assurance of NPP with WWER», OKB «Gidropress», Podolsk, May 28-31 2013 (in Russian).

7. *Sistema tehničeskogo diagnostirovaniya glavnyh tsyrkulyatsionnyh nasosnyh agregatov STD GTsNA-1391* [The system of technical diagnostics of the main circulation pumps units STD RCP-1391]. Available at: <http://www.all-pribors.ru/opisanie/56440-14-std-gtsna-1391-60256> (accessed: 05 Apr. 2016) (in Russian).

8. Protocol No. 9/04-03-02/24-PR meeting on «Diagnosis of mechanical equipment and reactor installations of nuclear power plants.» Moscow. JSC «Concern Rosenergoatom», 28.12.2015 (in Russian).

9. Sergienko A.B. Digital Signal Processing. Saint Petersburg. Peter Publ., 2003. 604 p. (in Russian).

10. Mozgalevsky A.V, Parkhomenko P.P., Soghomonyan E.S. *Tehničeskaya diagnostika: Spravochnik* [Technical diagnostics: Reference book]. Vol. 9: Reliability and efficiency in technique. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1987. 240 p. (in Russian).

11. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. Basics of technical diagnostics. Moscow. Energoizdat Publ., 1981. 460 p. (in Russian).

12. Skomorohov A.O., Slepov M.T. Pattern recognition in APL with application to reactor diagnostics. *APL Quote Quad*. 2000, v. 29, no. 3, pp. 164-172.

13. Thie J. Reactor Noise. New York, 1963.

14. 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, Nov. 20-24, 1995.

15. Albrecht R., Seifritz W. The Information in Neutron Fluctuations. *Nuclear Science and Engineering*, 1970, v. 41, pp. 417-420.

16. Thie J.A. Reactor noise monitoring for malfunctions. *Reactor Technology*. 1971, v. 14, no. 4, pp. 354-365.

17. Seifritz W., Stegemann D. Reactor noise analysis. *Atomic Energy Review*. 1971, v. 9, no. 1, pp. 129-135.

18. Uhric R.E. Noise analysis in power reactor. *Electrical World*. 1973, v. 180, no. 11, pp. 44-56.

19. Williams M.M.R. Random Processes in Nuclear Reactors. Pergamon Press. Ltd. Oxford England. 1974.

20. Saito K. On the theory of power reactor noise (I, II, III). *Ann. of Nucl. Sci. and Eng.*, 1974, v. 1, pp. 3-253.

21. Saito K. Source papers in reactor noise. *Progress in Nuclear Energy*, 1979, v. 3, pp. 157-168.

22. Bernard P., Brillon A., Carre J.C. Neutron noise measurements of PWR's. *Progress in Nuclear Energy*. 1977, v. 1, pp. 333-346.

Authors

Fedorov Anatoly Ivanovich, Chief Engineer

E-mail: FedorovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

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

E-mail: SlepovMT@nvnpp1.rosenergoatom.ru