

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.4

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ
ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НА
НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС

© 2021 Г.В. Аркадов*, В.И. Павелко*, В.П. Поваров**, М.Т. Слепов**

* АО «Акционерное общество «Научно-технический центр «Дианром», Обнинск, Калужская обл., Россия
** Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, Нововоронеж, Воронежская обл., Россия

Техническая диагностика имеет прочные позиции в мировом инженерном сообществе, входит в нормативы и рекомендации как для действующих, так и для проектируемых АЭС. Все зарубежные действующие атомные станции в той или иной мере оснащены средствами технической диагностики реакторных установок либо с момента, либо в ходе модернизаций. Независимо от диагностической архитектуры АСУТП, будь то локальные системы проектов компании Framatom или централизованные системы компании Westinghouse, диагностические алгоритмы носят универсальный характер. Эксплуатирующая организация АО «Концерн Росэнергоатом» уделяет большое внимание развитию стационарных систем технической диагностики. За последние 20 лет ими оснащены практически все российские энергоблоки. Это способствовало как повышению безопасности эксплуатации, так и обеспечению надежности, и продлению ресурса действующих АЭС. В статье представлена классификация систем технической диагностики, особенности их эксплуатации на площадке НВОАЭС за 30-летний период времени. Сложные, наукоемкие системы диагностики с большим затруднением и скепсисом продвигаются в эксплуатационную практику. Системы медленно наполняются диагностическими знаниями, но наш зарубежный взыскательный заказчик, несомненно, их потребует.

Ключевые слова: система технической диагностики, техническое диагностирование, контроль технического состояния, блочный щит управления, блочный пункт управления, аномальное событие, система контроля вибрации, система обнаружения свободных предметов, система контроля течей по влажности, система акустического контроля течей, система комплексного диагностирования, аномалия, искусственный интеллект, пуско-наладочные испытания, система пуско-наладочных измерений, главный циркуляционный контур, акустическая стоячая волна, система контроля, управления и диагностики, программно-технический комплекс.

Поступила в редакцию 01.11.2021

После доработки 12.11.2021

Принята к печати 17.11.2021

Введение

Техническое диагностирование оборудования в отличие от контроля технического состояния, является неформализованной и скорее творческой процедурой, чем отработанной технологией (по крайней мере, на начальном этапе), что в свою очередь создаёт определённые проблемы при практическом использовании систем технической диагностики (далее – СТД) на энергоблоках АЭС. С одной стороны, это вызвано необходимостью кропотливой и длительной работы по обработке больших объёмов информации для формирования критериев и адаптации методик к конкретному оборудованию АЭС. С другой стороны, возрастают требования к квалификации персонала диагностических подразделений АЭС. Для подготовки и обучения специалиста по техническому диагностированию необходимо освоить

большой объем разнородных знаний и навыков. Кроме указанных выше факторов, следует учесть то обстоятельство, что диагностические заключения о состоянии оборудования даются с некоторой вероятностной оценкой, что тоже часто вызывает непонимание не только у административного и ремонтного персонала АЭС, привыкшего оперировать конкретными детерминированными значениями, но и собственно персонала диагностических подразделений. Процессорная мощность и объем хранения информации даже первых промышленных компьютеров позволяли существенно облегчить расчёты по известным алгоритмам, и, казалось, позволит полностью исключить участие человека (оператора) из цепочки обработки. Естественное желание получить законченное диагностическое заключение, что в свою очередь позволит оптимизировать процесс диагностирования до готовых сообщений, передаваемых на блочный щит/пункт управления (БЩУ/БПУ). Однако процесс повседневной эксплуатации СТД выявил серьёзные недостатки как в алгоритмики работы самих систем, так и собственно в организации работ на площадках АЭС.

Контроль технического состояния и техническое диагностирование

Возвращаясь к вопросу практики, необходимо остановиться на некоторых особенностях собственно процессов диагностирования, а также причинах как объективного, так и субъективного характера, препятствующих, а иногда делающих невозможным надёжное и качественное выявление аномального состояния оборудования на ранних стадиях его возникновения. Основной причиной, является непонимание разницы между такими категориями как «контроль технического состояния» и «техническое диагностирование». К сожалению, нормативная база сильно отстаёт в своём развитии от технических средств, поэтому источник [1] остаётся основным документом, определяющим терминологию по техническому диагностированию. Исходя из определений, термин «контроль технического состояния (англ. technical state inspection)» определяется согласно [1] как «проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени. Контроль технического состояния не даёт информацию о причинах выхода из строя или о времени сохранения работоспособного состояния. «Техническое диагностирование (англ. technical diagnosis)» согласно [1] помимо определения собственно технического состояния объекта, требует поиска места и причин неисправности, а также прогноза поведения исследуемого объекта. Целесообразно проиллюстрировать сказанное выше конкретным примером. Одним из ключевых параметров, позволяющих судить о состоянии роторного оборудования, является параметр вибрации (например, виброскорость). К настоящему времени вопрос вибрационного контроля на АЭС (именно контроля, а не диагностирования) полностью отработан. Так, например, ещё к концу прошлого века разработана необходимая нормативная база [2-7] с установленными граничными значениями по абсолютным значениям вибрации, при достижении которых, контролируемое оборудование должно быть остановлено немедленно, эксплуатироваться ограниченное время или без ограничений. По установленным руководящими документами значениям (виброскорость согласно [2-7]) довольно легко выявить как момент выхода оборудования на недопустимый режим работы, так и необходимую технологическую операцию (останов/ограниченная по времени эксплуатации). Данная процедура, согласно [1], является контролем вибрационного состояния и лишь первым шагом собственно к операции технического диагностирования. Именно на этом шаге и происходит подмена понятий «контроль» на «диагностирование». Вибрационный контроль на АЭС может осуществляться как в ручном режиме (обход оборудования подготовленным персоналом), либо специализированной системой вибрационного контроля, при этом сущность процесса остаётся неизменной – измерение текущего

значения виброскорости и ее сравнение с пороговыми значениями, утверждёнными руководящими документами. Долгое время именно эта процедура носила наименование «техническая диагностика» и действительно благодаря некоторым приемам (анализ трендов) была способна предсказывать временные интервалы, когда контролируемое оборудование выйдет за пределы безопасной эксплуатации. Однако подлинный переход к диагностированию осуществляется вслед за требованиями производства:

- точное определение состояния контролируемого оборудования в любой момент времени (по статистике известно, что задолго до момента выхода контролируемых параметров за пределы безопасной эксплуатации, имеется интервал, когда оборудование с начинающимся развиваться дефектом работает относительно длительное время);
- сокращение сроков ремонта (определение конкретного вида неисправности, и как следствие продолжительности безопасной эксплуатации);
- прогнозирование на максимально возможный срок состояния оборудования (актуализация и повышение эффективности ремонтных кампаний);
- планирование закупочных процедур при ремонтах (точное определение номенклатуры закупаемых изделий и запасных частей);
- определение (подтверждение) ресурсных характеристик (соответствие рассчитанных по проекту характеристик реально наблюдаемым на производстве).

Не следует рассматривать представленный выше перечень полным, это всего лишь некоторые факторы, способствующие переходу от «контроля технического состояния» оборудования к «диагностированию». К концу прошлого века известные мировые кампании стали выходить на рынок с полностью готовыми (по заверениям разработчиков) системами технического диагностирования [8, 9]: например, Westinghouse Electric Company дала концептуальное решение ALLY, AG Siemens – серия систем SÜS, KÜS, ALÜS, FAMOS [10]. Собственно, с этого времени следует отсчитывать начало эксплуатации СТД на АЭС.

Эксплуатация различных СТД на площадке Нововоронежской АЭС СТД 1 поколения

В 1992 г. в соответствии со Сводными мероприятиями по повышению надёжности и безопасности действующих АЭС с ВВЭР (СМ-90-ВВЭР) начато оснащение энергоблоков 3, 4 НВОАЭС (ВВЭР-440) и 1, 2 энергоблоков КолАЭС (ВВЭР-440) системами технической диагностики. Ввиду отсутствия в то время готовых к поставке СТД было принято решение использовать импортные системы, но с привязкой их к оборудованию отечественных энергоблоков. Выбор был сделан в пользу решений фирмы «Siemens» ФРГ и в 1992-1993 годах на площадке НВОАЭС были введены в эксплуатации системы:

- SÜS – система контроля вибрации;
- KÜS – система контроля свободных и слабозакреплённых предметов;
- ALÜS – система акустического контроля течей.

Активная эксплуатация СТД выявила как достоинства систем, так и их существенные недостатки, главными из которых являются:

1. Высокая стоимость комплектующих, что затрудняло оперативно осуществлять замену выходящих из строя единиц, усугубленное полным отсутствием предложений на рынке в то время.

2. Разные подходы к эксплуатации, инженерной поддержке эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту оборудования АЭС, принятые на Российских и условно, западных АЭС, не позволяли организовать полноценный информационный обмен как между СТД и эксплуатирующим персоналом, так и между собственно АЭС и

научными организациями, что в конечном итоге нивелировало весь эффект от ввода систем.

3. Полное отсутствие регламентирующих документов и нормативной базы, делающих СТД системами с «непонятным статусом» и, следовательно, «не особенно нужных» при эксплуатации АЭС.

Обмен информацией между системами не предполагался, каждая отдельная СТД оперировала информацией, полученной только по своим каналам и не обменивалась с системами более высокого уровня (рис. 1). В качестве типовых СТД на рисунке 1 представлены:

- СКВ – система контроля вибрации;
- СОСП – система контроля свободных предметов;
- САКТ – система акустического контроля течей;
- СКТВ – система контроля течей по влажности.

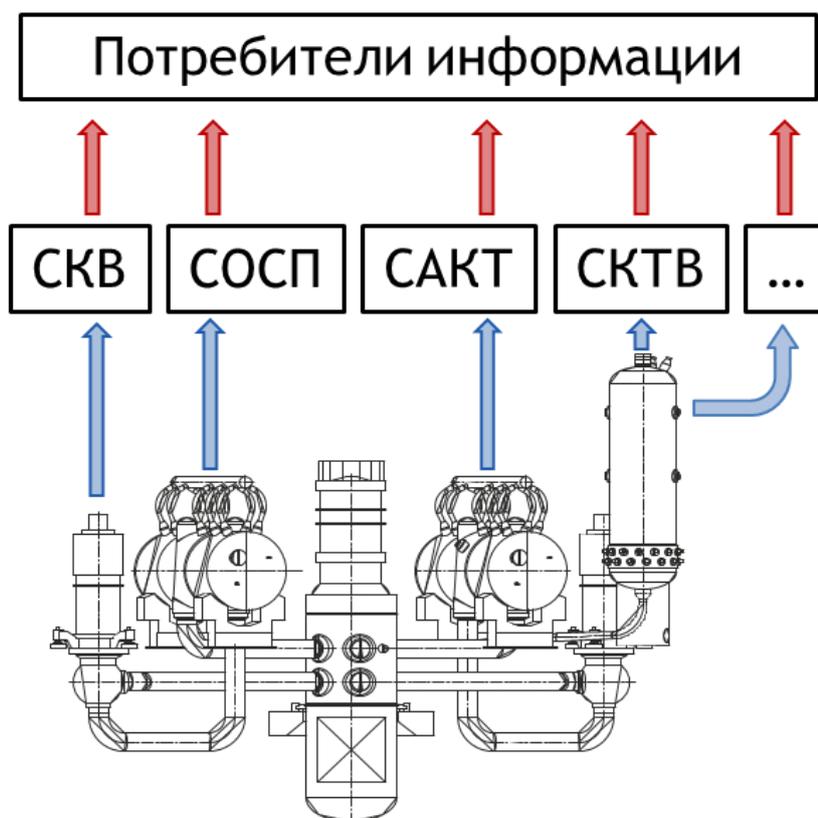


Рисунок 1 – Структурная схема информационных потоков СТД 1 поколения [Block diagram of information flows of 1st generation technical diagnostics systems]

СТД 2 поколения

Не смотря на неоднозначный эффект от эксплуатации СТД первого поколения, в дальнейшем все новые энергоблоки, вводимые в работу, оснащались штатными системами уже на уровне проекта, а уже введённые в эксплуатацию, дооснащались, согласно разработанных мероприятий. По сравнению с предыдущим поколением, СТД второй генерации создавались с учётом выявленных недостатков и ошибочных решений, выявленных при вводе и собственно эксплуатации, что в конечном итоге позволило создать достаточно надёжные программно-технические комплексы. Благодаря согласованным действиям удалось выделить организации, отвечающие за создание и поставку специализированных СТД на АЭС (ЗАО «НТЦД», АО ЦКБМ «Энергонасос» и др.), что практически полностью решило проблему с необходимыми комплектующими и своевременным ремонтом. Аналогично был повышен ресурс

работы технических средств на основе новой элементной базы. Также была разработана и введена необходимая рабочая документация для работы с СТД, определяющая их статус, возможности, алгоритмы действия персонала и др.

В целом, СТД второго поколения, при должном техническом обслуживании и грамотном использовании (наличие квалифицированного персонала на АЭС является главным критерием) показали себя надёжными системами, приносящими определённый профит. В качестве примера следует рассмотреть [9], где представлены случаи регистрации СТД аномальных событий различного типа на энергоблоках ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Особенно показателен пример регистрации аномалии на энергоблоке 1 АЭС «Тяньвань» с разрушением лопасти рабочего колеса ГЦН в 2006 г., когда три независимые друг от друга СТД зарегистрировали данное событие. Главной особенностью СТД 2 поколения следует считать объединение СТД в единый комплекс систем, получивший название система контроля, управления и диагностики (СКУД), где помимо собственно диагностических систем включены другие, например, система внутриреакторного контроля (СВРК). Кроме этого, информация с СТД поступает на АСУТП верхнего уровня (рис. 2).

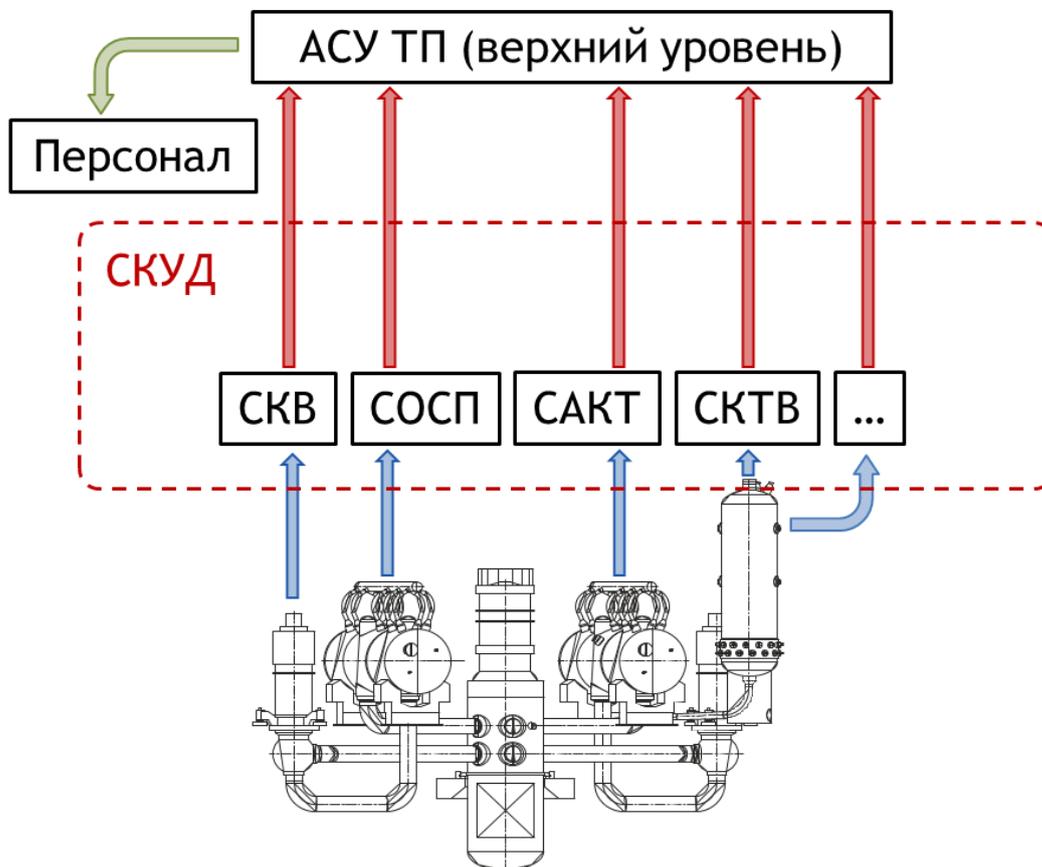


Рисунок 2 – Структурная схема информационных потоков СТД 2 поколения [Block diagram of information flows of 2nd generation technical diagnostics systems]

В дальнейшем развитие СТД шло по пути интеграции локальных систем в единое информационное пространство с включением в него данных от различных блочных информационных систем для оптимизации алгоритмов диагностирования, поэтому на последних введённых в эксплуатацию энергоблоках ВВЭР-1000 появляется новая система контроля, управления и диагностики (СКУД), взамен отдельных (локальных) СТД. СТД 2 поколения на площадке НВОАЭС не эксплуатировались, однако, максимального уровня развития и интеграции СКУД, на настоящее время, удалось достичь на энергоблоке поколения 3+ – ВВЭР-1200.

СТД 3 поколения (на примере РУ ВВЭР-1200 блока 1 НВОАЭС-2)

В задачи данной статьи не входит детальное описание технических и программных средств СТД, входящих в СКУД энергоблока 1 НВОАЭС-2, а только самое общее представление о выполняемых функциях и решаемых с помощью их задачам. На рисунке 3 представлена принципиальная схема организации информационного обмена между отдельными (локальными) СТД, входящих в СКУД.

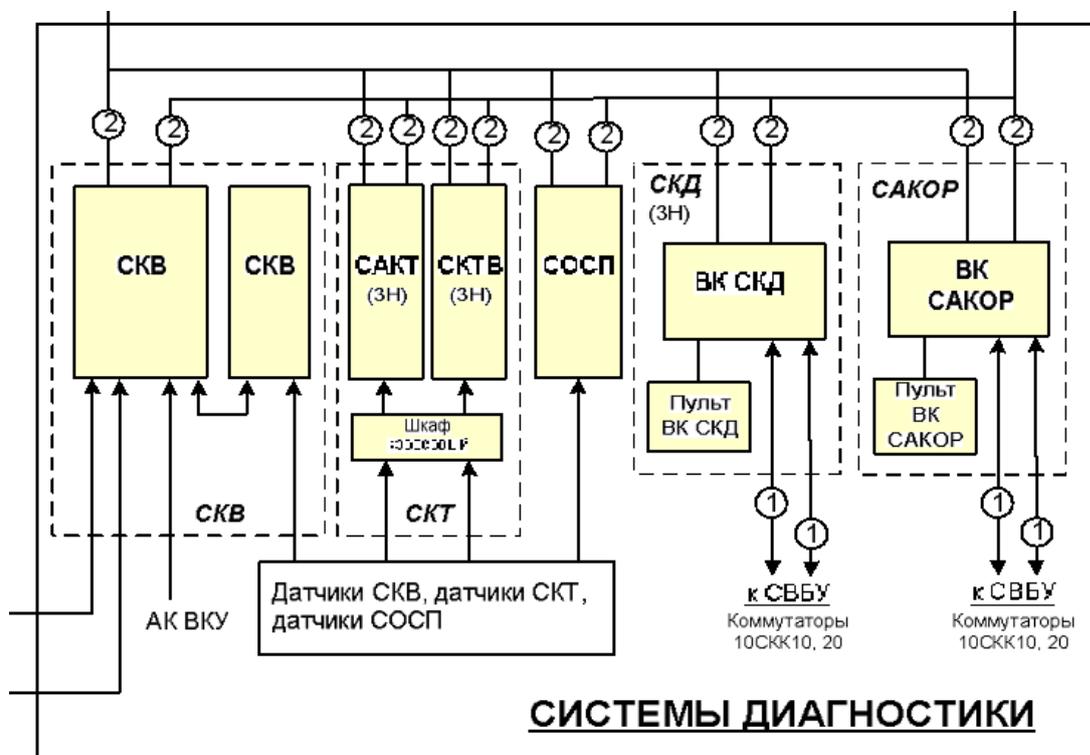


Рисунок 3 – Структурная схема СКУД [Block diagram of the monitoring, control and diagnostic system]

В качестве локальных СТД представлены:

1 СКВ – система контроля вибрации. Контроль вибрационного состояния оборудования главного циркуляционного контура (ГЦК), корпуса РУ, внутрикорпусных устройств (ВКУ) и ТВС. В отличие от СТД поколения 1 и 2 – непрерывный режим работы.

2 САКТ – система акустического контроля течей. Контроль и локализация течей на оборудовании и ГЦК. Режим работы непрерывный.

3 СКТВ – система контроля течей по влажности, предназначена для контроля и локализации течей, основана на другом физическом принципе, чем САКТ. Осуществляет поиск и локализацию течей на оборудовании, ГЦК и частично в помещениях с размещением оборудования 2 контура. Режим работы непрерывный.

4 СОСП – система обнаружения свободных предметов. Главная задача – обнаружение и локализация свободных и слабозакрепленных предметов в пределах 1 контура РУ. Режим работы непрерывный.

5 СКД – система комплексного диагностирования. Является основной системой в контуре диагностики. Главная задача – обработка поступающей от других систем информации, её представление и по мере отработки алгоритмов диагностирования выдача законченных диагностических сообщений. Режим работы непрерывный.

6 САКОР – система автоматизированного контроля остаточного ресурса. Осуществляет оценку остаточного ресурса основного оборудования РУ на основе непрерывного контроля теплотехнических параметров при различных режимах

эксплуатации. Достаточно спорное, с точки зрения авторов, решение проектантов о включении данной системы в контур диагностических систем СКУД, о чём более подробно будет изложено дальше.

Помимо рассмотренных выше STD, на энергоблоке 1 НВОАЭС-2 эксплуатируются и другие системы, не включённые в состав СКУД, но выполняющие функции диагностирования:

7 STD ГЦНА – система технической диагностики ГЦНА, предназначена для диагностирования такого важного агрегата как ГЦНА. Поставляется АО ЦКБМ «Энергонасос» совместно с алгоритмами автоматического диагностирования.

8 КСДА – комплексная система диагностики арматуры, пока единственный экземпляр, введенный в промышленную эксплуатацию на энергоблоке 2 НВОАЭС-2. Предназначение – автоматизированное диагностирование электроприводной арматуры, главным образом арматуры систем безопасности.

9 АСВД – автоматизированная система вибрационной диагностики. Основное предназначение – вибрационный контроль турбоагрегата и различного роторного оборудования, также имеет в своём составе программный модуль для автоматического диагностирования.

Как видно из самого общего описания, количество STD, введенных в эксплуатацию на энергоблоке ВВЭР-1200, является численно самым большим и крайне разнородным по многим параметрам: принятым подходам к диагностированию, по функциональному назначению, используемым алгоритмам обработки информации и др.

Преимущества опережающего ввода в эксплуатацию STD

На настоящее время энергоблок ВВЭР-1200 обладает самым большим в количественном отношении парком штатных STD. Правильное и рациональное использование заложенного в системы потенциала является залогом безопасной эксплуатации оборудования всего энергоблока. Однако перед собственно эксплуатацией систем, необходим достаточно длительный и трудоёмкий процесс их последовательного ввода в работу, обычно затягивающийся на 1 или 2 года. Длительность процедуры определяется не столько устранением ошибок при монтаже или заменой выходящих из строя компонент (хотя без этого не обойтись), а тонкой настройкой и адаптацией STD к оборудованию энергоблока. Даже построенные по одному проекту и на одной площадке энергоблока имеет незначительные отличия, делающие невозможным простое копирование настроек систем и перенос баз данных с системы на систему. Необходимость длительной процедуры настройки, наличие грамотного и подготовленного персонала для данной работы, ограниченные временные интервалы при пуске, а также то, что большинство систем, входящих в СКУД относятся классу 4Н по влиянию на безопасность согласно НП-001-15, часто заставляли переносить ввод в работу STD на период освоения мощности энергоблоком или уже на этап промышленной эксплуатации. При таком подходе не только теряется крайне нужный в дальнейшем объём информации, что само по себе недопустимо, но и присутствуют уникальные режимы эксплуатации РУ, не повторяемые в дальнейшем никогда при проектной эксплуатации энергоблока.

Идея о вводе в эксплуатацию STD до ХГО неоднократно поднималась и дискутировалась, например, в [9]. Но впервые такая концепция была успешно реализована при пуске энергоблока 1 НВОАЭС-2. Рамки данной статьи не позволяют подробно рассказать обо всех этапах работы, в [11, 14] представлены схемы коммутации STD для создания комбинированных измерительных схем, состав технических средств, а также некоторые полученные результаты. В качестве положительной практики следует озвучить только главные моменты:

1. Опережающий ввод систем в работу позволил выявить ошибки, допущенные при монтаже СТД, устранение которых занимало намного меньше времени, по причинам полной доступности оборудования и отсутствия радиационных полей, а также возможность использовать имитационные средства воздействия на первичные преобразователи, что в конечном итоге позволило выполнить качественную калибровку измерительных каналов систем.

2. Доказан практический эффект от использования штатных СТД совместно с системами комплекса пуско-наладочных измерений (СПНИ) при вводе в работу энергоблока. Включение стационарных диагностических систем в штатный состав СПНИ позволило бы с одной стороны уменьшить количество измерительных каналов СПНИ, их функционал могли взять на себя СТД, что в конечном итоге позволило сократить затраты на проведение работ. С другой стороны, полученная в ходе пусковых операций информация позволила бы более точно настроить СТД и существенно ускорить ввод их в эксплуатацию. Полученный опыт, к сожалению, не изучен должным образом и не используется при вводе в эксплуатацию других энергоблоков.

3. Наличие стандартных, унифицированных разъемов с необработанными аналоговыми сигналами, во всех задействованных системах позволяло собирать уникальные измерительные схемы с использованием портативных сборщиков данных, с необходимым количественным и качественным составом измерительных каналов, нацеленных на решение конкретной диагностической задачи [9]. Так, например, получены синхронные многоканальные записи с регистрацией сигналов акселерометров, проксиметров СТД ГЦНА и датчиков пульсации давления (ДПД) СПНИ. При этом СТД ГЦНА собственных ДПД не имеет.

4. Реализация на этапах ХГО и ввода в эксплуатацию нетипичных для нормальной эксплуатации РУ режимов невозпроизводимых в дальнейшем, позволило получить уникальную информацию об акустических стоячих волнах (АСВ), а также, что особенно важно, выявить и описать вклад АСВ в вибрационные характеристики контура. В конечном итоге, создана стройная теория виброакустического взаимодействия, ознакомиться с которой можно в [12].

5. Успешная, эффективная и надежная работа СТД целиком зависит от качественной подготовки персонала АЭС, эксплуатирующего системы, несмотря на их максимальную степень автоматизации. При штатном вводе систем в эксплуатацию специалисты цеха тепловой автоматики (ЦТАИ), отвечающие за ремонт технических средств и отдела технической диагностики (ОТД) – собственно эксплуатация систем, получают доступ к системам, в лучшем случае в самом конце работ по вводу блока в промышленную эксплуатацию, часто не имея соответствующего опыта работы с СТД. Поэтому, вынуждены решать проблемы методом проб и ошибок, что не способствует качественной эксплуатации СТД. В случае же опережающего ввода в эксплуатацию, персонал как ЦТАИ, так и ОТД активно включен в процесс, особенно при проведении ПНИ, поэтому на начало штатной эксплуатации систем имеет свой наработанный опыт.

Положительный эффект от опережающего ввода систем в эксплуатацию на энергоблоке с РУ ВВЭР-1200 не исчерпывается пятью представленными здесь пунктами, а гораздо шире, и на сегодняшний день до конца не обобщён, что не позволяет тиражировать опыт НВОАЭС на другие АЭС, как в России, так и за рубежом.

Выводы

В статье обобщен опыт эксплуатации СТД различных поколений на площадке НВОАЭС. Уже не надо доказывать, что системы диагностирования имеют право на жизнь, как это было 30 лет назад. Многотрудный путь, пройденный институтами и предприятиями атомной отрасли России по развитию ВВЭР, определил

диагностирование не просто как модное научное направление, а как проектно заложенный атрибут в комплексе программно-технических средств обеспечения безопасной эксплуатации АЭС.

Прежде чем система диагностирования будет способна выполнять свои функции, она должна быть наполнена диагностическими знаниями. Очевидно, что небольшая группа исследователей не в состоянии охватить всю представленную выше проблематику, как и авторы данной статьи не претендуют на полноту изложения опыта работы с СТД. В статье в краткой и доступной форме излагаются основные проблемы и вопросы, выявленные при эксплуатации СТД на площадке НВОАЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный Стандарт Союза ССР. Техническая диагностика. Термины и определения. ГОСТ 20911-89. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 13 с.
2. Государственный Стандарт Союза ССР. Приборы виброизмерительные. Термины и определения. ГОСТ 16819-71. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 8 с.
3. Государственный Стандарт Союза ССР. Акселерометры низкочастотные линейные. ГОСТ 18955-73. – Москва : Издательство стандартов, 1973. – 14 с.
4. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Термины и определения. ГОСТ 24346-80. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 26 с.
5. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Обозначения и единицы величин. ГОСТ 24347-80. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 6 с.
6. Государственный Стандарт Союза ССР. Система стандартов по вибрации. Приборы для измерения вибрации вращающихся машин. Общие технические условия. ГОСТ 25275-82. – Москва : Издательство стандартов, 1993. – 11 с.
7. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Динамические характеристики стационарных машин. Основные положения. ГОСТ 26043-83. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 16 с.
8. *Аркадов, Г.В.* Виброшумовая диагностика ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, А.И. Усанов; под ред. А.А. Абагяна. – Москва : Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
9. *Аркадов, Г.В.* Системы диагностирования ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, Б.М. Финкель. – Москва : Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
10. *Аникин, Г.Г.* Опыт внедрения систем виброконтроля на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР-440 / Г.Г. Аникин, В.И. Павелко // Теплотехника. – 1999. – № 6. – С. 12-17.
11. *Федоров, А.И.* Комплексные измерения диагностических параметров оборудования на блоке 1 НВАЭС-2 в процессе опытно-промышленной эксплуатации / А.И. Федоров, М.Т. Слепов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017 – № 3. – С. 77-87.
12. *Аркадов, Г.В.* Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – Москва : Наука, 2018. – 469 с. – ISBN 978-5-02-040138-9.
13. *Аркадов, Г.В.* Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – Москва : Наука, 2021. – 221 с. – ISBN 978-5-02-040869-2.
14. *Павелко, В.И.* Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 / В.И. Павелко, М.Т. Слепов, В.У. Хайретдинов // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2016 – № 4. – С. 44-54.
15. *Аркадов, Г.В.* Виброакустика ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 11 международной научно-технической конференции, 21-24 мая 2019 года, ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия. – URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk2019-061.pdf>.
16. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к обоснованию прочности внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР» (НП-102-17). Введены приказом №409 от 05.10.2017. – Консорциум «Кодекс». – URL : <https://docs.cntd.ru/document/542609712>.
17. *Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I.* The experimental definition of the acoustic standing waves series shapes, formed in the coolant of the primary circuit of VVER-440 type reactor // Progress in Nuclear Energy. 1995. Vol. 29, N 3/4, p.153-170. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00005-5](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00005-5)
18. *Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I.* Some results of the vibrations analysis on the VVER-440 type reactor vessel top head and on the facilities of its primary circuit six loops // A symposium on

- nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN VII, June 19-23, 1995, Avignon, France. Session 9 – Vibrations structures: modeling and monitoring. Vol. 2, p.9.5. P. 168-172.
19. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibration Acoustics Applied to VVER-1200 Reactor Plant / Singapore: World Scientific, 2021. – 586 p. ISBN 978-981-123-466-8 <https://doi.org/10.1142/12220>

REFERENCES

- [1] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya. GOST 20911-89 [The State Standard of the USSR. Technical Diagnostics. Terms and Definitions. GOST 20911-89]. Moscow: Publishing House of Standards, 1989. 13 p. (in Russian).
- [2] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Pribory vibroizmeritel'nye. Terminy i opredeleniya. GOST 16819-71. [The State Standard of the USSR. Vibration Measuring Devices. Terms and Definitions. GOST 16819-71]. Moscow: Standartinform, 2010. 8 p. (in Russian).
- [3] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Akselerometry nizkochastotnye linejnye. GOST 18955-73. [The State Standard of the USSR. Accelerometers are Low-Frequency Linear. GOST 18955-73]. Moscow: Publishing House of Standards, 1973. 14 p. (in Russian).
- [4] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Vibraciya. Terminy i opredeleniya. GOST 24346-80. [State Standard of the USSR. Vibration. Terms and Definitions. GOST 24346-80]. Moscow: Standartinform, 2010. 26 p. (in Russian).
- [5] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Vibraciya. Oboznacheniya i edinicy velichin. GOST 24347-80. [State Standard of the USSR. Vibration. Designations and Units of Quantities. GOST 24347-80]. Moscow: Publishing House of Standards, 1986. 6 p. (in Russian).
- [6] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Sistema standartov po vibracii. Pribory dlya izmereniya vibracii vrashchayushchih mashin. Obshchie tekhnicheskie usloviya. GOST 25275-82. [State Standard of the USSR. System of Vibration Standards. Devices for Measuring Vibration of Rotating Machines. General Technical Conditions. GOST 25275-82]. Moscow: Publishing House of Standards, 1993. 11 p. (in Russian).
- [7] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Vibraciya. Dinamicheskie karakteristiki stacionarnyh mashin. Osnovnye polozheniya. GOST 26043-83. [State Standard of the USSR. Vibration. Dynamic Characteristics of Stationary Machines. The Main Provisions. GOST 26043-83]. Moscow: Publishing House of Standards, 1984. 16 p. (in Russian).
- [8] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibroshumovaya diagnostika VVER [Vibration Noise Diagnostics of WWER]. Edited by A.A. Abagyan. Moscow: Energoatomizdat, 2004. 344 p.
- [9] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. Sistemy diagnostirovaniya VVER [WWER Diagnostic Systems.]. Moscow: Energoatomizdat, 2010. 391 p. (in Russian).
- [10] Anikin G.G., Pavelko V.I. Opyt vnedreniya sistem vibrokontrolya na AES s reaktornymi ustanovkami tipa VVER-440 [Experience in the Implementation of Vibration Control Systems at Nuclear Power Plants with WWER-440 Type Reactor Installations]. Heat Engineering. 1999. №6. P.12-17 (in Russian).
- [11] Fedorov A.I., Slepov M.T. Kompleksnye izmereniya diagnosticheskikh parametrov oborudovaniya na bloke 1 NVAES-2 v processe opytно-promyshlennoj ekspluatatsii [Complex Measurements of Diagnostic Parameters of Equipment at Unit 1 of NWPP-2 during Pilot Operation]. University News. Nuclear Power Engineering. 2017. №3. P.77-87 (in Russian).
- [12] Arkadov G.V. Pavelko, V.I., Slepov M.T. Vibroakustika v prilozheniyah k reaktornoj ustanovke VVER-1200 [Vibroacoustics in the Annexes to the Installation of the Reactor WWER-1200]. Moscow: Nauka, 2018. 469 p. ISBN 978-5-02-040138-9 (in Russian).
- [13] Arkadov G. V. Pavelko, V. I., M. T. Slepov SHumovoj monitoring v prilozheniyah k reaktornoj ustanovke VVER-1200 [Noise Monitoring in the Annexes to the Installation of the WWER-1200 Reactor]. Moscow: Nauka, 2021. 221 p. ISBN 978-5-02-040869-2 (in Russian).
- [14] Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. Opyt provedeniya kompleksnyh izmerenij s ispol'zovaniem raznorodnyh sistem na razlichnyh etapah puska energobloka VVER-1200 [Experience in Conducting Complex Measurements Using Heterogeneous Systems at Various Stages of the WWER-1200 Power Unit Start-Up]. University News. Nuclear Power Engineering. 2016. №4. P.44-54 (in Russian).
- [15] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroakustika VVER-1200 [WWER-1200 Vibroacoustics]. [Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with WWER: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference on May 21-24, 2019 OKB «Gidropress»], Podolsk, Russia. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk2019-061.pdf> (in Russian).
- [16] Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Osnovnye trebovaniya k obosnovaniyu

- prochnosti vnutrikorpusnyh ustrojstv reaktorov tipa VVER» (NP-102-17). Vvedeny prikazom №409 ot 05.10.2017 [Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. "Basic Requirements for Substantiating the Strength of Internal Devices of WWER Type Reactors" (NP-102-17). Introduced by Order No. 409 of 05.10.2017]. «Codex» Consortium. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542609712> (in Russian).
- [17] Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. The Experimental Definition of the Acoustic Standing Waves Series Shapes, Formed in the Coolant of the Primary Circuit of WWER -440 Type Reactor // Progress in Nuclear Energy. 1995. Vol. 29, N 3/4, p.153-170. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00005-5](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00005-5) (in English).
- [18] Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. Some Results of the Vibrations Analysis on the WWER-440 Type Reactor Vessel Top Head and on the Facilities of its Primary Circuit Six Loops // A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics. SMORN VII, June 19-23, 1995, Avignon, France. Session 9 – Vibrations Structures: Modeling and Monitoring. Vol. 2, p.9.5. P. 168-172 (in English).
- [19] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibration Acoustics Applied to WWER-1200 Reactor Plant / Singapore: World Scientific, 2021. – 586 p. – ISBN 978-981-123-466-8. – <https://doi.org/10.1142/12220> (in English).

Operational Experience of Stationary Technical Diagnostics Systems at Novovoronezh NPP

G.V.Arkadov^{*1}, V.I. Pavelko^{*2}, V.P. Povarov^{**3}, M.T. Slepov^{**4}

^{*} JSC "Joint Stock Company "Scientific and Technical Center "Diaprom", Koroleva str., 6, Obninsk, Kaluga region, Russia 249031

^{**} Novovoronezh NPP Branch of JSC «Concern Rosenergoatom», Industrial zone Yuzhnaya 1, Novovoronezh, Voronezh region, Russia 396072

¹e-mail: skrepka1964@gmail.com

²e-mail: vippvi@mail.ru

³e-mail: povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru

⁴ORCID iD: 0000-0001-5563-0526

e-mail: SlepovMT@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract – Technical diagnostics has a strong position in the global engineering community. It is included in the standards and recommendations for both existing and projected nuclear power plants. All foreign operating nuclear power plants are more or less equipped with means of technical diagnostics of reactor installations either from the very beginning or during modernization. Regardless of the diagnostic architecture of the automated control system, whether it is Framatom's local project systems or Westinghouse's centralized systems, diagnostic algorithms are universal. The operating organization of Rosenergoatom Concern JSC pays great attention to the development of technical diagnostics tools. Over the past 20 years, almost all Russian power units have been equipped. This contributed both to improving the safety of operation, and ensuring reliability, and extending the life of existing nuclear power plants. The article presents the authors' classification of technical diagnostics systems, the features of their operation at the Novovoronezh NPP site for a 30-year period of time. Complex, high-tech diagnostic systems are moving into operational practice with great difficulty and skepticism. The systems are slowly being filled with diagnostic knowledge, but our demanding foreign customer will undoubtedly require this diagnostic knowledge.

Keywords: technical diagnostics system, technical diagnostics, technical condition monitoring, block control panel, block control point, abnormal event, vibration monitoring system, free object detection system, humidity leak monitoring system, acoustic leak monitoring system, integrated diagnostics system, anomaly, artificial intelligence, commissioning tests, commissioning measurement system, main circulation circuit, acoustic standing wave, monitoring, control and diagnostics system, software and hardware complex.