

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ СВОБОДНЫХ И СЛАБОЗАКРЕПЛЕННЫХ ПРЕДМЕТОВ В КОНТУРЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС

А.В. Воронов, М.Т. Слепов

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



В реакторных установках с ВВЭР полностью не исключено появление в главном циркуляционном контуре свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов. Опыт эксплуатации показывает, что раннее обнаружение и оценка параметров подобных инцидентов позволяет своевременно принять комплекс мер, направленных на устранение или минимизацию повреждений основного оборудования реакторной установки. По этой причине большинство современных энергоблоков с реакторами с водой под давлением (PWR, ВВЭР) оснащаются системой обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов (СОСП). На строящихся блоках данные системы закладываются как штатные, а энергоблоки, уже введенные в промышленную эксплуатацию, оснащаются такими системами. Требования к СОСП устанавливаются международными стандартами. Приводимые научно-исследовательские работы в данной области нацелены на определение первопричины возникновения акустической аномалии и локализации ее эпицентра. Также не менее значимыми являются работы, нацеленные на определение массы свободного предмета (СП). Наиболее точное определение данного параметра позволит получить представление о возможной природе СП до его изъятия из первого контура и сделать заключение о том, является ли данный предмет случайно попавшим, либо он является открепленной частью парогенераторов, главных циркуляционных насосов, внутрикорпусных устройств или запорной и регулирующей арматуры.

Ключевые слова: ВВЭР-440, ВВЭР-1200, системы технической диагностики, система обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов, ударное событие, нейронная сеть, классификация, класс событий, главный циркуляционный контур, парогенератор.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие свободных предметов (СП), перемещающихся по главному контуру циркуляции (ГЦК) теплоносителя ВВЭР, создаёт реальную угрозу безопасной эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Частичная или полная блокировка СП потока теплоносителя способна привести к ухудшению теплообмена и возможному перегреву

© А.В. Воронов, М.Т. Слепов, 2022

оболочек твэлов, изменению температуры топлива и росту интенсивности распухания топлива. Попадание СП в механизмы рабочих органов системы управления и защиты создаёт угрозу нештатной работы системы и (или) полного отказа, что подтверждает случай на АЭС «Пакш» (фрагментирование забытой при планово-предупредительном ремонте платформы и «затирание приводов» АРК – аварийной регулирующей кассеты) [1]. Однако не следует считать, что наличие СП в ГЦК является крайне редким событием и связано только с небрежным производством работ при ремонтных операциях. Основная причина наличия СП в контуре это разрушение по различным причинам конструктивных элементов ЯЭУ, что нашло отражение в специализированном разделе источника [2]. В качестве типичного примера данного класса следует упомянуть событие на АЭС «Тяньвань» в 2006 г. [1] с разрушением лопасти рабочего колеса ГЦН на этапе освоения мощности энергоблока 1.

Для идентификации СП в контуре циркуляции и его локализации разработана и активно эксплуатируется система обнаружения свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов, функция которой заключается в обнаружении и оценке параметров СП в контуре циркуляции теплоносителя. В настоящее время большинство РУ с реакторами с водой под давлением (PWR, ВВЭР) оснащены системой технической диагностики СОСП, которая позволяет выявлять аномалии, связанные с возникновением слабозакрепленных и открепленных предметов, на ранних этапах их возникновения. Работа СОСП основана на анализе сигналов, получаемых от измерительных каналов (ИК). В основе каждого ИК лежит пьезоакустический датчик (далее по тексту – датчик).

Существует несколько международных стандартов, определяющих требования, которым должна удовлетворять СОСП:

- U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) Regulatory Guide 1.133 (1981) [3];
- American Society of Mechanical Engineers (ASME) Standard OM-2017 [4];
- International Electrotechnical Commission (IEC) Standard IEC-609887 [5].

Большое количество работ по тематике СОСП, появившихся в последнее время, направлены прежде всего на решение задачи о локализации места ударного воздействия на оборудование ЯЭУ. Локализация источника удара является одной из важнейших функций СОСП при диагностировании оборудования РУ [4]. Точное определение места возникновения акустической аномалии необходимо для диагностирования оборудования РУ. В случае появления свободных и посторонних предметов важно отслеживать пути их перемещения по главному циркуляционному контуру, а также места их локализации.

К настоящему времени выполнено большое количество исследований по способам локализации источника удара [6 – 15]. Традиционный и максимально просто реализуемый метод локализует источник акустической аномалии на оборудовании, контролируемом датчиком, который первым зарегистрировал удар. При наличии в более чем одном ИК зарегистрированного эффекта источник локализуется с использованием разностей времен прихода (РВП) переднего фронта волны в двух или более ИК. К одному из наиболее известных методов с использованием РВП можно отнести метод пересечения гипербол (МПГ) [7, 11], который осуществляется в ручном режиме и требует от оператора системы дополнительных экспертных знаний. Алгоритм имеет простое аналитическое решение для плоскости, однако для сложной поверхности первого контура РУ он неприемлем. МПГ хорошо работает при локализации акустических аномалий на корпусе реакторной установки, что было доказано при многолетней эксплуатации системы контроля свободных и слабозакрепленных предметов разработки фирмы «Siemens» (KUES).

Ещё один метод [8, 14, 15] основан на поиске ближайшего соответствия зарегистрированным РВП, рассчитанным ранее. Для этого первый контур разбивается на сегменты небольшой площади или контрольные точки. Учитывая, что скорость акустических волн в металле известна, может быть предварительно рассчитано время прохождения волны от

отдельных сегментов к датчикам. Полученные значения РВП сохраняются в базе данных. При регистрации акустической аномалии ее местоположение выбирается из базы данных в качестве ближайшего сохраненного вектора к измеренному в соответствии с евклидовым расстоянием. В работе [15] анализируются ошибки метода локализации и его структурные ограничения. Для определения времени прихода необходимо знать скорость распространения акустической волны. Поскольку она зависит от материала, кинетической энергии взаимодействия, массы, формы СП и других параметров, то данный метод вносит большую неопределённость в оценке локализации источника акустической аномалии.

Предлагаемый алгоритм в автоматическом режиме производит локализацию до точки на поверхности первого контура РУ. Он основан на вычислении кратчайшего пути по 3D-модели поверхности первого контура РУ. Алгоритм является гибким и легко адаптируется под любую РУ с водой под давлением.

ПЕРВАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ СИСТЕМА KUES

В 1992 г. в соответствии со Сводными мероприятиями по повышению надёжности и безопасности действующих АЭС с ВВЭР (СМ-90-ВВЭР) было начато оснащение энергоблоков № 3, 4 Нововоронежской АЭС (ВВЭР-440) и энергоблоков № 1, 2 Кольской АЭС (ВВЭР-440) системами технической диагностики (СТД). Ввиду отсутствия в то время готовых к поставке отечественных 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 гг. на площадке Нововоронежской АЭС были введены в эксплуатацию системы

- KUES – контроля свободных и слабозакреплённых предметов;
- SUES – контроля вибрации;
- ALUES – акустического контроля течей.

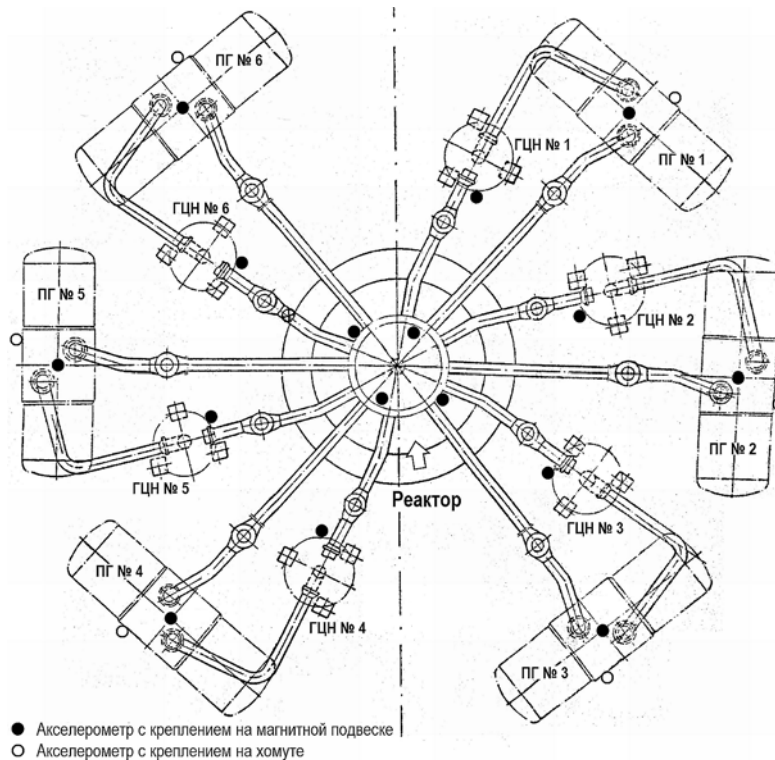


Рис. 1. Схема расположения датчиков в системе KUES

Принцип работы системы KUES основан на постоянном сравнении среднеквадратичного значения (СКЗ) сигналов от датчиков с устанавливаемым оператором двумя типами порогов (жёсткозаданным – абсолютным и постоянно рассчитываемым в зависимости от текущего значения сигнала – относительным). При превышении одного из двух этих порогов происходит регистрация события, вызвавшего локальное возмущение. Система регистрирует повышение шума как ударное событие независимо от причин его возникновения – удары предметов, разогрев оборудования, кавитационные явления и др. Поэтому причину возникновения аномалии может определить только оператор системы, обладающий необходимыми навыками работы и имеющий определённый опыт в обработке событий ударного типа [14]. При поставке KUES не предусматривалась поставка специализированного программного обеспечения (ПО) для обработки событий, поэтому на начальном этапе эксплуатации системы были задействованы исключительно на сбор информации вместо её обработки. Указанное обстоятельство полностью нивелировало весь эффект предполагаемой эксплуатации. Регистрация событий осуществлялась в диапазоне 1 – 10 кГц датчиками, размещёнными на оборудовании в местах с максимальной вероятностью появления СП (рис. 1).

Обработанные значения сигналов со всех датчиков заносятся в кольцевую память (буфер кратковременного хранения) при постоянном расчёте двух СКЗ с программно задаваемым временем осреднения: кратковременное СКЗ (5 мс) и долговременное СКЗ (820 мс). По долговременному СКЗ вычисляется относительный порог. Кратковременное СКЗ сравнивается с относительным и абсолютным порогом. При превышении сигналом одного из порогов происходит регистрация события – запись из кольцевой памяти временных реализаций всех каналов в течение 50 мс, в том числе 10 мс предыстории события. Для калибровки системы имеется импульсный молоток, при запуске которого оператор может нанести калибровочный удар строго определённого импульса и по откликам на всех каналах проверить настройку системы [14, 15].

Длительная эксплуатация KUES на третьем и четвёртом энергоблоках Нововоронежской АЭС показала правильность алгоритмов, положенных в основу работы системы, а также надёжность технических средств. Тот факт, что на первом и втором энергоблоках КолАЭС системы KUES, введённые в эксплуатацию в 1991 – 1992 гг., работают до настоящего времени достаточно красноречив. Однако системы контроля свободных и слабозакреплённых предметов первых поколений имели существенные недостатки:

- невозможность работы без участия оператора при выявлении аномалий ударного типа;
- отсутствие алгоритмов локализации места ударного воздействия;
- отсутствие алгоритмов определения импульса (массы) СП;
- неравномерность калибровочных воздействий по петлям (один импульсный молоток на одной петле);
- отсутствие встроенной базы данных по ударным аномалиям;
- отсутствие обмена информацией с организациями, осуществляющими инженерную поддержку.

СОСП ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАЗРАБОТКИ

Энергоблоки № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2 (ВВЭР-1200) оснащены СТД отечественной разработки, построенной на технических решениях АО «НТЦД». В состав СТД входят системы

- СКВ – контроля вибрации;
- СОСП – обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов;
- САКТ – акустического контроля течей;

- СКТВ – влажностного контроля течей;
- СКД – комплексной диагностики.

Принцип работы и регистрации событий СОСП, так же, как и у KUES, основан на сравнении СКЗ сигналов от датчиков с абсолютным и относительным порогами, задаваемыми оператором системы. При получении сигнала о превышении одного из порогов происходит процесс регистрации события, в ходе которого оцифрованные сигналы от всех задействованных в событии каналов длительностью 60 мс записываются в структурированном виде на жесткий диск. Помимо сигналов акустического шума на жестком диске сохраняются технологические параметры РУ, важные для определения состояния контролируемого оборудования, получаемые по локальной сети от СКД [14, 15].

В состав СОСП входят 20 датчиков, установленных на оборудовании и трубопроводах первого контура, регистрирующих акустический сигнал в диапазоне 1 – 20 кГц. Для диагностирования работоспособности каналов используются четыре импульсных молотка (по одному на каждую петлю). На рисунке 2 указано местоположение датчиков и импульсных молотков.

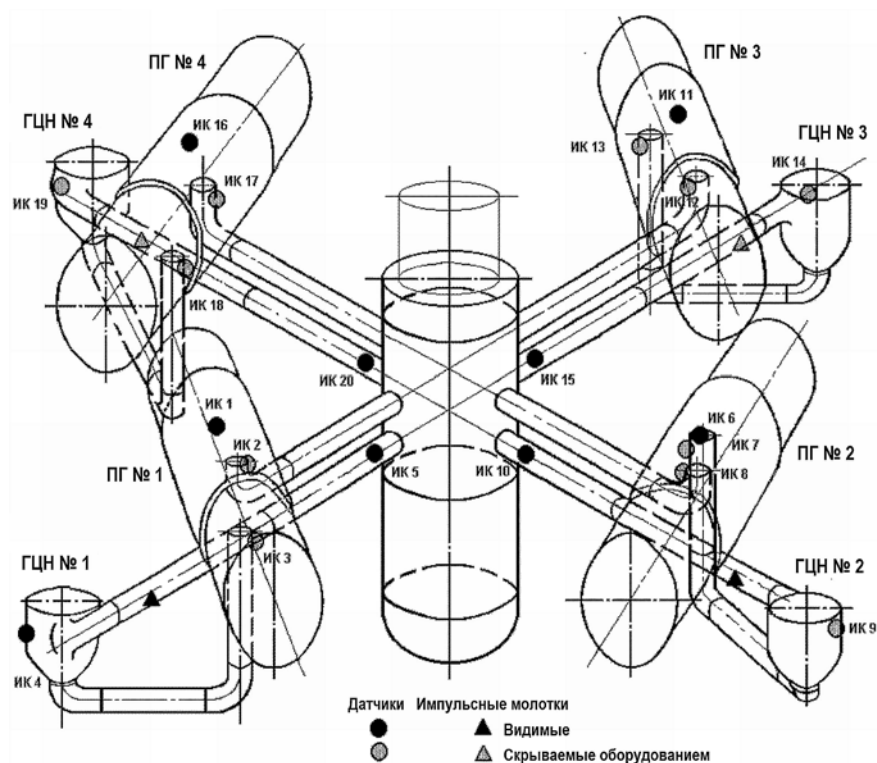


Рис. 2. Схема расположения датчиков и импульсных молотков

Обработка и анализ зарегистрированных событий выполняется прикладным ПО СОСП, поставляемым совместно с системой. Данное ПО написано под операционную систему на ядре Linux и выполняет следующие функции:

- определение характерных параметров сигналов акустического шума по каждому измерительному каналу;
- классификация события;
- определение по результатам классификации компонента РУ, являющегося источником шумовой аномалии (локализация);
- сохранение результатов в базе данных.

Классификация и локализация события выполняется на основании созданных пользо-

вателем классов. При создании классов пользователь указывает, с каким компонентом РУ связано появление событий данного класса. На основе этого осуществляется локализация. Обобщенное сообщение о регистрации события с привязкой к результатам локализации отправляется в СКД и далее в систему верхнего блочного уровня (СВБУ). Событие, которое не соответствует ни одному из классов, помечается как «неизвестное».

Оператор СОСП имеет возможность проводить обработку и отсроченный анализ событий, записанных на жёсткий диск. Во время проведения отсроченного анализа можно уточнить время начала акустического всплеска, создать новый класс или отредактировать существующий.

ПО СОСП представляется широкий набор функций обработки и анализа событий:

- ведение базы данных классов;
- построение графиков СКЗ и огибающих;
- взаимно корреляционный анализ;
- спектральный анализ.

СОСП нового поколения оснащён функциональным ПО, предоставляющим обширный набор инструментов обработки и анализа событий. Разработанное в среде операционной системы Linux ПО СОСП может использоваться совместно с операционными системами отечественной разработки. За счет того, что СОСП, эксплуатируемая на энергоблоках № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2, является отечественной разработкой, имеется возможность оказания инженерной поддержки со стороны разработчика [19]. Несмотря на внушительный перечень достоинств, СОСП имеет ряд недостатков:

- большое количество зарегистрированных помех;
- отсутствие датчиков непосредственно на корпусе РУ;
- отсутствие алгоритмов определения импульса (массы) СП.

В настоящее время АО «НТЦД» ведет разработку следующего поколения ПО СОСП, использующего алгоритмы искусственных нейронных сетей (ИНС).

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

За последнее десятилетие искусственные нейронные сети (ИНС) нашли широкое применение во многих областях науки и техники. Данный математический аппарат настолько универсален, что имеет реализацию как в программном исполнении, так и в аппаратном. В основе ИНС лежит искусственный нейрон [16], состоящий из массива синапсов, блока суммирования и блока нелинейного преобразования (рис. 3).

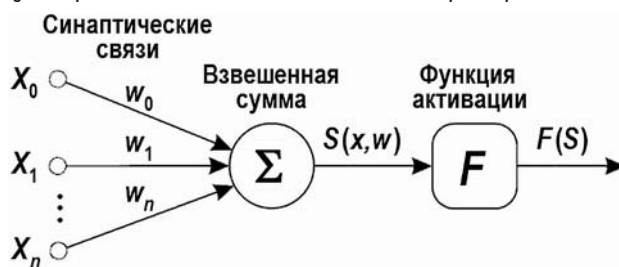


Рис. 3. Структурная схема искусственного нейрона

Каждый синапс обладает весовым коэффициентом, характеризующим силу синаптической связи по аналогии с биологическим нейроном.

Входной сигнал, проходя через синапс, усиливается или ослабляется в зависимости от значения весового коэффициента. Далее, в блоке суммирования, выполняется сложение значений входных сигналов. Если значение суммы превышает определенный порог, то на выходе блока нелинейного преобразования генерируется сигнал возбуждения нейрона, передающийся на следующий нейрон. Значение порога зависит от выб-

ранной функции активации [17].

Таким образом, ИНС состоит из массива искусственных нейронов, образующих многослойную структуру, выполняющую преобразование входного сигнала в выходной в соответствии с заданной функцией (рис. 4).

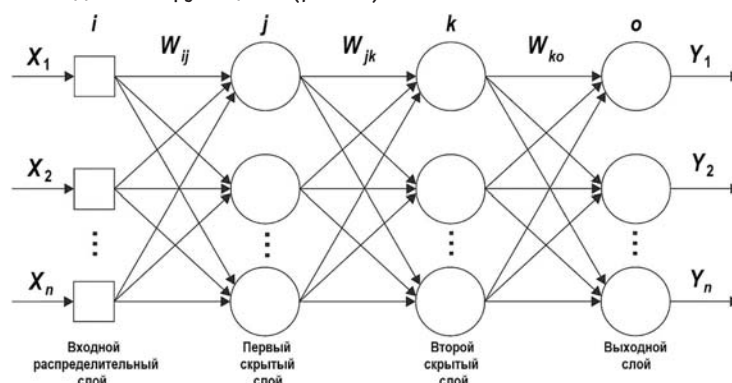


Рис. 4. Структурная схема искусственной нейронной сети

Значения весовых коэффициентов определяются во время обучения нейронной сети. ИНС, весовые коэффициенты которых изменяют свое значение во время работы, являются самоадаптирующимися. Такие сети способны корректировать свою работу в зависимости от изменений внешних и внутренних условий.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА В ПО СОСП

АО «НТЦД» ведет разработку нового поколения ПО СОСП, включающего в себя улучшенные механизмы анализа зарегистрированных событий и нейросетевую обработку данных. Данное ПО находится в стадии тестирования и не применяется в СОСП, действующих на энергоблоках. В рамках тестирования в базу данных этого ПО были загружены зарегистрированные события на энергоблоках № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2.

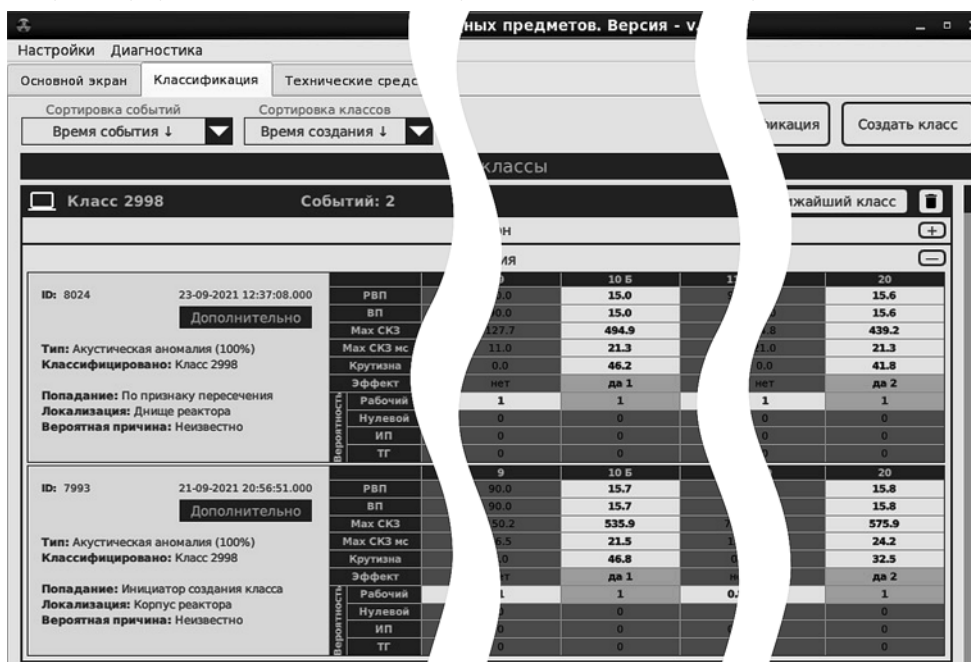


Рис. 5. Фрагмент рабочего окна ПО СОСП с результатами классификации событий

Алгоритм ИНС в данном ПО выполняет расчет вероятности принадлежности события к одному из типов: «акустическая аномалия», «импульсная помеха» или «нет эффекта».

Отнесение события к одному из типов определяет дальнейший алгоритм анализа. Алгоритм работы и структура ИНС скрыты от оператора и не требуют его вмешательства в работу сети. Данное ограничение позволяет использовать ПО оператору без навыков работы с математическим аппаратом ИНС.

Перед использованием ПО для полноценного анализа событий проводилась работа по обучению ИНС, в рамках которой выполнялся предиктивный анализ баз данных событий, зарегистрированных на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 [18, 19].

Применение ИНС на одном из важнейших этапов анализа событий позволяет повысить его качество и вероятность определения первопричины возникновения акустического всплеска.

Помимо нейросетевой обработки новое поколение ПО СОСП обладает более обширным набором инструментов и функций, позволяющих повысить качество проводимого анализа. Также улучшен механизм классификации событий (рис. 5). Для удобства восприятия из рисунка удалены (в графическом редакторе) каналы, на которых нет отклика на акустическую аномалию.

На рисунке 5 показан фрагмент рабочего окна ПО СОСП с двумя зарегистрированными событиями, отнесенными к одному классу. Для каждого ИК рассчитывается вероятность принадлежности зарегистрированного в нем акустического сигнала к одному из четырех типов акустических сигналов: «Рабочий», «Нулевой», «ИП», «ТГ».

К типу «Рабочий» относятся ИК, в которых регистрируется повышенное значение амплитуды акустического сигнала в момент регистрации события. В ИК типа «Нулевой» не регистрируется повышенное значение амплитуды акустического сигнала в момент регистрации события. Если ИК относится к типу «ИП», то в нем регистрируется импульсная помеха. ИК с зарегистрированным сигналом, поданным от тестового генератора, относится к типу «ТГ».

Созданные классы применяются не только к новым событиям, как в предыдущей версии ПО, но также и к уже записанным в архив. Данная функция достигается улучшенной системой хранения данных.

Еще одной отличительной особенностью данной версии ПО является возможность сопряжения СОСП с комплексной системой диагностики электроприводной арматуры (КСДА), что позволяет определить с максимальной вероятностью события, первопричиной которых было срабатывание арматуры [20 – 24].

Подводя итог, можно сказать, что совокупность нейросетевой обработки и улучшенных инструментов анализа событий повышает качество проводимого анализа и увеличивает вероятность определения причины возникновения акустической аномалии и её локализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт эксплуатации системы технической диагностики СОСП на Нововоронежской АЭС подтверждает высокую эффективность системы, позволяющей на ранней стадии обнаруживать в циркуляционном контуре свободные предметы, способные нанести повреждения основному оборудованию реакторной установки, а также выявлять слабозакрепленные предметы до стадии их полного открепления.

На основании накопленного опыта специалистами АО «НТЦД» совместно со специалистами Нововоронежской АЭС проводится доработка и модернизация аппаратной части, алгоритмического и программного обеспечения СОСП. Применение современного инструментария комплексного анализа зарегистрированных событий СОСП и внедрение алгоритма ИНС является важным этапным достижением в решении основной задачи – определения первопричины акустического всплеска и его локализации.

Литература

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. – М.: Наука, 2019. – 391 с. ISBN 978-5-02-040184-6 .
2. Аварии и инциденты на атомных электростанциях. / Учеб. пособ. под ред. проф. С.П. Соловьева. – Обнинск: ИАТЭ, 1992. – 300 с.
3. Regulatory Guide 1.133. Loose Part Detection Program for the Primary System of Light Water Cooled Reactors : tech. rep. – U.S. Nuclear Regulatory Commission. 1981. – 6 p.
4. Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants. Part 12. Loose Part Monitoring. – American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2015. – 523 p.
5. IEC 60988. Nuclear Power Plants. Instrumentation Important to Safety. Acoustic Monitoring Systems for Detection of Loose Parts: Characteristics, Design Criteria and Operational Procedures. – 2009. – 75 p.
6. ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Общее руководство. Часть 1. – М.: Стандартинформ, 2015. – 33 с.
7. Olma B. Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of LWR. // Progress in Nuclear Energy. – 1985. – Vol. 15. – PP. 583-594. DOI: [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(85\)90086-1](https://doi.org/10.1016/0149-1970(85)90086-1) .
8. Szappanos G. et al. Analysis of Measurements Made by HELPS Loose Part Detection System During Installation and Operation Periods. // Progress in Nuclear Energy. – 1999. – Vol. 34. – No. 3. – PP. 185-193. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(98\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(98)00004-3) .
9. Kim J.S. et al. Development of Automatic Algorithm for Localizing Loose Parts with a Steam Generator. // Nuclear Engineering and Design. – 2003. – Vol. 219. – No. 3. – PP. 269-276. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00281-9](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00281-9).
10. Choi Y.C., Park J.H., Choi K.S. An impact Source Localization Technique for a Nuclear Power Plant by Using Sensors of Different Types. // ISA Transactions. – 2011. – Vol. 50. – No. 1. – PP. 111-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2010.08.004> .
11. Park J.H., Kim Y.H. Impact Source Localization on an Elastic Plate in a Noisy Environment. // Measurement Science and Technology. – 2006. – Vol. 17. – No. 10. – PP. 2757-2766. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/10/030> .
12. Park G.Y. et al. An Estimation Method for Impact Location of Loose Parts. // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48. – No. 4. – PP. 360-370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.09.012> .
13. Ki H.I., Seong In M., Soon Woo H. ANN Based Localization of Metal Ball Impacts on Reactor Pressure Boundary Structure. // Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Gyeongju, Korea, October 26-27. – 2017. – 3 p.
14. Fignedy S., Oksa G. Modern Methods of Signal Processing in the Loose Part Monitoring System. // Progress in Nuclear Energy. – 2005. – Vol. 46 (3-4). – PP. 253-267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.03.008> .
15. Liska J., Kunkel S. Localization of Loose Part Impacts on the General 3D Surface of the Nuclear Power Plant Coolant Circuit Components. // Progress in Nuclear Energy. - 2017. - Vol. 99. - PP. 140-146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.05.004> .
16. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
17. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн. 4: Учеб. пособие для вузов. / Под общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.
18. Zheng H., Cao Y., Yang J. A Method for Estimating Impact Location of Loose Part Using ННТ. / Proc. SPIE 7130. Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements. 71304S (31 December 2008). – 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.819732> .
19. Page E.S. Cumulative Sum Charts. // Technometrics. – 1961. – Vol. 3. – No. 1. – PP. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1961.10489922> .
20. Максимов И.В., Павелко В.И., Перевезенцев В.В., Трыков Е.Л. Метод выделения полезного сигнала для системы обнаружения свободных, слабозакрепленных и посто-

ронних предметов в главном циркуляционном контуре реакторной установки с водяным энергетическим реактором. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2018.– No. 1.– С. 4-15. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-1-4-15> .

21. *Максимов И.В., Перевезенцев В.В.* Метод локализации удара для системы обнаружения свободных предметов в контуре циркуляции теплоносителя реакторных установок с ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 4. – С. 28-38. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.4.02> .

22. *Truong C., Oudre L., Vayatis N.* Selective Review of Offline Change Point Detection Method. Электронный ресурс: <https://arxiv.org/abs/1801.00718> (дата доступа 10.11.2021).

23. *Lavielle M.* Using Penalized Contrasts for the Changepoint Problem. // Signal Processing. – 2005. – Vol. 85. – No 8. – PP. 1501-1510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.01.012> .

24. *Dijkstra E.W.* A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. // Numerische Mathematik. – 1959. – Vol. 1. – No. 1. – PP. 269-271. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01386390> .

Поступила в редакцию 16.11.2021 г.

Авторы

Воронов Алексей Викторович, инженер
E-mail: VoronovAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Слепов Михаил Тимофеевич, начальник отдела, к.т.н.
E-mail: SlepovMT@nvnpp1.rosenergoatom.ru

UDC 621.039.4

EXPERIENCE OF THE USE OF DETECTION SYSTEMS FOR LOOSE PARTS AND WEAKLY FIXED OBJECTS IN THE COOLANT CIRCULATION CIRCUIT OF NOVovorONEZH NPP REACTOR INSTALLATIONS

Voronov A.V., Slepov M.T.

** Branch of Concern Rosenergoatom JSC Novovoronezh NPP
1 Industrial zone Yuzhnaya, 1396072 Novovoronezh, Voronezh reg., Russia

ABSTRACT

The operating organization Concern Rosenergoatom JSC pays great attention to the development of stationary systems of technical diagnostics. Over the past 20 years, almost all Russian power units have been equipped with them. This contributed both to improving the safety of operation, and ensuring reliability, and extending the life of existing nuclear power plants. 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.

In reactor installations with VVER, the appearance of loose, loosely attached and foreign objects in the main circulation circuit is not completely excluded.

Operational experience shows that early detection and assessment of the parameters of such incidents allows timely adoption of a set of measures aimed at eliminating or minimizing damage to the main equipment of the reactor plant. For this reason, most modern power units with pressurized water reactors (PWR, VVER) are equipped with a system for detecting loose parts and weakly fixed objects. On the blocks under construction, these

systems are laid down as standard, and power units already put into commercial operation are equipped with such systems. The requirements for the system for detecting loose and weakly fixed objects are established by international standards. The research works in this field are aimed at determining the root cause of the acoustic anomaly and localization of its epicenter. Also, no less significant are the works aimed at determining the mass of a free object (FO). The most accurate definition of this parameter will allow you to get an idea of the possible nature of the FO before it is removed from the primary circuit and make a conclusion about whether this item is accidentally hit, or it is a detached part of steam generators, main circulation pumps, internal devices or shut-off and control valves.

Key words: VVER-440, VVER-1200, technical diagnostics systems, system for detecting loose and loosely attached objects, shock event, neural network, classification, class of events, main circulation circuit, steam generator.

REFERENCES

1. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. *VVER Diagnostic Systems*. Moscow. Nauka Publ., 2019, 391 p. ISBN 978-5-02-040184-6 (in Russian).
2. *Accidents and Incidents at Nuclear Power Plants*. Textbook. Ed. Professor S.P. Solovyov. Obninsk. IATE, 1992, 300 p. (in Russian).
3. Regulatory Guide 1.133. *Loose Part Detection Program for the Primary System of Light Water Cooled Reactors*: Tech. Rep. – U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981, 6 p.
4. *Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants*. Part 12. Loose Part Monitoring. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2015, 523 p.
5. IEC 60988. *Nuclear Power Plants. Instrumentation Important to Safety. Acoustic Monitoring Systems for Detection of Loose Parts: Characteristics, Design Criteria and Operational Procedures*. 2009, 75 p.
6. GOST R ISO 13379-1-2015. *Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. Methods of Data Interpretation and Diagnostics. General Guidance*. Part 1. Moscow. Standartinform Publ., 2015, 33 p. (in Russian).
7. Olma B. Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of LWR. *Progress in Nuclear Energy*. 1985, v. 15, pp. 583-594; DOI: [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(85\)90086-1](https://doi.org/10.1016/0149-1970(85)90086-1).
8. Szappanos G. et al. Analysis of Measurements Made by HELPS Loose Part Detection System During Installation and Operation Periods. *Progress in Nuclear Energy*. 1999, v. 34, no. 3, pp. 185-193. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(98\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(98)00004-3).
9. Kim J.S. et al. Development of Automatic Algorithm for Localizing Loose Parts with a Steam Generator. *Nuclear Engineering and Design*. 2003, v. 219, no. 3, pp. 269-276. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00281-9](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00281-9).
10. Choi Y.C., Park J.H., Choi K.S. An impact Source Localization Technique for a Nuclear Power Plant by Using Sensors of Different Types. *ISA Transactions*. 2011, v. 50, no. 1, pp. 111-118; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2010.08.004>.
11. Park J.H., Kim Y.H. Impact Source Localization on an Elastic Plate in a Noisy Environment. *Measurement Science and Technology*. 2006, v. 17, no. 10, pp. 2757-2766; DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/10/030>.
12. Park G.Y. et al. An Estimation Method for Impact Location of Loose Parts. *Progress in Nuclear Energy*. 2006, v. 48, no. 4, pp. 360-370; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.09.012>.
13. Ki H.I., Seong In M., Soon Woo H. ANN Based Localization of Metal Ball Impacts on Reactor Pressure Boundary Structure. *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Gyeongju, Korea, October 26-27, 2017*, 3 p.
14. Fignedy S., Oksa G. Modern Methods of Signal Processing in the Loose Part Monitoring System. *Progress in Nuclear Energy*. 2005, v. 46 (3-4), pp. 253-267; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.03.008>.
15. Liska J., Kunkel S. Localization of Loose Part Impacts on the General 3D Surface of the Nuclear Power Plant Coolant Circuit Components. *Progress in Nuclear Energy*. 2017. v. 99, pp. 140-146; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.05.004>.

16. Haikin Simon. *Neural Networks: a Complete Course*, 2nd edition. Transl. from English. Moscow. Williams Publishing House, 2006, 104 p. (in Russian)
17. Golovko V.A. *Neural Networks: Training, Organization and Application*. Book 4: Studies. Manual for universities. Ed. A.I. Galushkin. Moscow. IPRZhR Publ., 2001, 256 p. (in Russian).
18. Zheng H., Cao Y., Yang J. A Method for Estimating Impact Location of Loose Part Using HHT. *Proc. SPIE 7130. Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*. 71304S (31 December 2008), 6 p.; DOI: <https://doi.org/10.1117/12.819732> .
19. Page E.S. Cumulative Sum Charts. *Technometrics*. 1961, v. 3, no. 1, pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1961.10489922> .
20. Maksimov I.V., Pavelko V.I., Perevezentsev V.V., Trykov E.L. Method of isolating a useful signal for a system for detecting loose, weakly secured and third-party objects in the main circulation circuit of a reactor installation with a water-water power reactor. *Vestnik MGTU im. Baumana. Ser.: Priborostroenie*. 2018, no. 1, pp. 4-15; DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-1-4-15> .
21. Maksimov I.V., Perevezentsev V.V. Impact Localization Method for the System of Free Objects in the Coolant Circulation Circuit of Reactor Installations with VVER. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 4, pp. 28-38; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.4.02> (in Russian).
22. Truong C., Oudre L., Vayatis N. *Selective Review of Offline Change Point Detection Method*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1801.00718> (accessed Nov. 10, 2021).
23. Lavielle M. Using Penalized Contrasts for the Changepoint Problem. *Signal Processing*. 2005, v. 85, no. 8, pp. 1501-1510; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.01.012> .
24. Dijkstra E.W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*. 1959, v. 1, no. 1, pp. 269-271; DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01386390> .

Authors

Voronov Alexey Viktorovich, Engineer

E-mail: voronovav@nvnpp1.rosenergoatom.ru

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

E-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru