

Г.И. ШАРАЕВСКИЙ, аспирант

Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт”, Украина, Киев

С.И. ШАПОВАЛОВА, доцент, к.т.н.
НТУУ “КПИ”

ОПЕРАТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

Рассмотрено состояние существующих автоматизированных систем управления технологическими процессами АЭС, обосновано использование нейрокompьютерного подхода к распознаванию спектральных реализаций стохастических диагностических сигналов, которые характеризуют текущее техническое состояние некоторых элементов и систем основного оборудования АЭС.

Современный этап развития ядерной энергетики характерен не только увеличением числа вводимых в эксплуатацию ядерных энергоблоков и их значительной единичной мощностью (до 1000–1500 МВт), но и высокой концентрацией ядерных энергоустановок (ЯЭУ) в пределах одной промплощадки (АЭС) (4–6 блоков с реакторами большой мощности). Поэтому проблема обеспечения безопасной эксплуатации АЭС приобрела особое значение. Сложность технологической схемы современной ЯЭУ приводит к необходимости контролировать средствами штатной автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) порядка аналоговых и дискретных сигналов (например, для реакторной установки (РУ) типа ВВЭР-1000), формируемых датчиками технологических параметров энергоустановки. Надежность человека-оператора энергоблока, как звена системы управления, является в контексте сформулированной проблемы особенно актуальной.

Постановка проблемы. Создание надежной системы распознавания режимов работы оборудования АЭС.

Цель статьи. На основании анализа существующих решений по математическому, программному и аппаратному обеспечению диагностики атомных энергоблоков (АЭ) обосновать использование нейросетевых методов.

Анализ последних исследований. Существующие системы оперативной диагностики (СОД) средств поддержки оператора (СПО) реализуют функции сбора и предоставления данных оператору на блочном щите управле-

ния. Все они являются мониторинговыми системами и к системам диагностики отнесены быть не могут.

Подробный анализ [1,2] диагностических экспертных систем (такие, например, как ALLY, SPDS, pwVDN (США); KUS'95, PCSUS (ФРГ), DMS, PODIA (Япония), СКУД (Россия) и др.), разработанных до настоящего времени в США и других странах мира, подтверждает это заключение.

Все существующие программные комплексы по сути являются только системами мониторинга эксплуатационных состояний РУ. Их математическое обеспечение основано на логике бинарного типа, использующей только допустимые пороговые значения диагностируемого сигнала нейтронного шума или его отдельных спектральных компонент. Ни один из существующих компьютерных комплексов СОД не является интеллектуальным, поскольку не может автоматически вырабатывать диагностические решения.

С другой стороны, в результате проведенных исследований [3] к настоящему времени уже определены параметры, по которым можно получить заключение о режиме работы оборудования. Апробированы надежные измерительные средства, позволяющие получить диагностический сигнал.

В работе [4] описаны эксперименты по сравнению надежности распознавания режимов работы оборудования с использованием различных архитектур нейронных сетей. Обоснована достоверная корректность этих методов.

При решении поставленной проблемы необходимо учесть:

1. Специализированные вычислительные системы, которые используются в настоящее время в структуре существующих технических средств АСУ ТП АЭС, включая компьютерные комплексы СПО и системы внутриреакторного контроля в процедурах оценки технического состояния ЯР, используют только детерминированные подходы, которые основаны на логике бинарного типа.

2. Существующие детерминированные процедуры контроля оборудования АЭС реализуют функции мониторинга этого оборудования и имеют своей задачей не допустить выхода интегрального уровня каждого из контролируемых параметров за предельные пороговые значения (уставки), которые устанавливаются исходя из требований регламента эксплуатации, а также опыта технического обслуживания ЯЭУ данного типа.

3. Применяемые в настоящее время детерминированные алгоритмы контроля оборудования ЯЭУ, включая ЯР, не являются адекватными реальной вероятностной природе технологических процессов в этом оборудовании и, в силу этого обстоятельства, не обеспечивают возможность распознавания начальных стадий возникновения аварийных режимов эксплуатации, в особенности режимов теплосъема в активной зоне ЯР.

4. Шумовые составляющие сигналов датчиков технологических параметров ЯР (нейтронного потока, давления и др.) содержат важную диагностическую информацию о характере условий теплосъема в активной зоне ЯР, которая, однако, в настоящее время практически не используется.

5. Распознавание характера процесса теплосъема с поверхности ТВЭЛ в активной зоне ЯР по спектральным параметрам информационно значимых шумов диагностических параметров принципиально позволяет получить важную диагностическую информацию о текущем эксплуатационном состоянии реактора, в особенности о характере режимов теплосъема с поверхности ТВЭЛ.

6. Нейрокомпьютерный диагностический подход, основанный на использовании эффективных топологий искусственных нейросетевых структур, является перспективным средством реализации оперативного контроля ре-

жимов теплосъема в ЯР на основе реализации алгоритмов распознавания предаварийных эксплуатационных состояний ЯЭУ по спектральным параметрам реакторных шумов.

В настоящей статье предлагается расширить функциональность существующих АСУ ТП возможностями диагностики режимов обоработки за счет использования модулей специальной среды моделирования нейронных сетей, описанной в [5].

1. Функциональные недостатки систем диагностики основного оборудования АЭС

Современное состояние проблемы разработки систем оперативной диагностики основного оборудования АЭС АЭС позволяет заключить следующее:

1. В настоящее время в атомной энергетике ведущих стран мира практически отсутствуют специализированные диагностические системы, а также другие технические средства в структуре систем внутриреакторного контроля (СВРК), СПО, АСУ ТП АЭС, способные обеспечить надежное автоматическое распознавание предаварийных и аномальных режимов теплосъема с теплоотдающей поверхности ТВЭЛ на основании шумов технологических параметров в активных зонах (АкЗ) водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов.

2. Существующие технические средства контроля технологических параметров АкЗ и режимов эксплуатации водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов, включая компьютерные комплексы СВРК и системы мониторинга основного оборудования ЯЭУ, в тепловыделяющих сборках (ТВС) реакторов некипящего и кипящего типов не обеспечивают возможности автоматического распознавания предаварийных условий перехода штатного режима теплосъема к одному из наиболее опасных видов аварийных процессов – кризису теплоотдачи при кипении теплоносителя на поверхности тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) [6].

3. Посредством существующих технических средств контроля, мониторинга и диагностики АкЗ водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов не могут быть обнаружены и надежно идентифицированы предшествующие кризису теплоотдачи аномальные теплофизические процессы в ТВС указанных реакторов, а именно: начало кипения на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ (проблемы об-

нарушения этого теплогидравлического режима на поверхности ТВЭЛ рассмотрены в [7]) и высокочастотная колебательная неустойчивость теплоносителя (характерные физические особенности основных видов неустойчивости двухфазного потока в парогенерирующих каналах систематизированы в [8]).

4. До настоящего времени практически не разработаны принципиальные подходы, а также необходимые методологические основы для создания нового – интеллектуального – поколения специализированных диагностических систем, способных обеспечить надежное автоматическое распознавание предаварийных и аномальных теплогидравлических процессов в АКЗ водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов.

5. Разработка методологических основ создания интеллектуальных компьютерных диагностических систем, предназначенных для раннего автоматического обнаружения и распознавания указанных выше предаварийных и аномальных теплогидравлических процессов путем анализа шумов технологических параметров в АКЗ водоохлаждаемых ядерных реакторов, является нерешенной до настоящего времени актуальной научной проблемой, которая в контексте реализации комплексной проблемы повышения уровня эксплуатационной безопасности ядерных энергоблоков АЭС имеет неоспоримое практическое значение.

2. Особенности распознавания режимов работы оборудования АЭС

Задача диагностики заключается в идентификации текущего режима работы оборудования к одному из эталонных режимов. Совокупность распознаваемых режимов $A_i, i = 1, 2, \dots, M$, образует множество распознаваемых классов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$. Каждый элемент является определенным типом режима работы и задается множеством спектральных значений преобразованного.

Решением может быть либо распределение вероятностей по режимам работы оборудования, либо номер наиболее вероятного режима.

Однако задачи распознавания режимов работы оборудования АЭС имеют следующие особенности:

1. Существенно ограниченный объем обучающих выборок для формирования множества эталонных состояний диагностического объекта.

2. Высокий уровень зашумленности полезного диагностического сигнала маскирующими технологическими шумами, которые не связаны с подлежащими идентификации физическими процессами в оборудовании.

3. Сложный стохастический характер полезного диагностического сигнала, который подлежит автоматическому распознаванию.

Объективный характер указанных особенностей распознавания штатных, аномальных и предаварийных режимов эксплуатации в элементах и системах основного оборудования АЭС обусловлен следующими физическими факторами. Прежде всего, реальная опасность повреждения ответственных элементов оборудования АЭС (например, ТВЭЛ) в процессе получения обучающих массивов данных для реализации процедуры статистического обучения распознающей системы при воспроизведении предаварийных режимов эксплуатации этого оборудования в известной мере ограничивает возможности использования наиболее эффективных – непараметрических – подходов для создания распознающих систем диагностического назначения. Аналогичные проблемы имеют место также и при реализации геометрического подхода к распознаванию предаварийных режимов эксплуатации оборудования АЭС, поскольку этот подход также требует достаточно представительных, хотя и сокращенных, массивов данных по предаварийным режимам. Таким образом, традиционные возможности математических моделей распознавания случайных объектов ограничены.

С другой стороны, концепция нейронных сетей для решения данной проблемы является более универсальной. Существуют специальные архитектуры нейронных сетей, которые позволяют проводить обучение по минимальной обучающей выборке (например, нейронная сеть Хэмминга). Доказано, что нейронные сети позволяют делать корректное заключение по диагностическому сигналу или спектру со сложной вероятностной структурой в предаварийных режимах эксплуатации оборудования.

3. Диагностический комплекс работы оборудования АЭС

Программное обеспечение разработанного диагностического комплекса включает в себя подсистемы:

- 1) предобработки данных;
- 2) визуализации данных;

3) нейросетевой диагностики.

Подсистема предобработки данных формирует входной вектор нейронной сети по следующей схеме;

- прямое преобразование Фурье;
- обнуление шумовой составляющей спектра;
- обратное преобразование Фурье.

Подсистема визуализации данных представляет на экране монитора:

- отображение распознаваемого сигнала;
- визуализацию моделируемого по уровню шума спектрального сигнала;
- визуализацию двухмерной карты Кохонена;
- визуализацию трехмерной карты Кохонена.

Особенностью подсистемы визуализации являются дополнительные возможности ее адаптации, которые включают:

- коррекцию параметров моделирования входного сигнала для определения оптимальной размерности исходного вектора (δ_p — отклонение в полосе пропускания, δ_s — отклонение в полосе подавления, f_p — граничная частота полосы пропускания, f_s — граничная частота полосы подавления);
- возможность выбора и настройки основных параметров нейронных сетей ($\eta(n)$ — параметр скорости обучения, $h_{j,i(x)}(n)$ — функция окрестности области обучения).

С целью сравнения возможностей разработанного программного диагностического комплекса, а также существующих систем мониторинга далее представлены их сравнительные характеристики. Так, современный уровень состояния проблемы диагностического обеспечения ядерных энергоблоков достаточно объективно отражают функции СОД типа ALLY, которые, в целом, подобны функциональным возможностям комплекса SPDS. Несмотря на достаточно полный охват комплексом ALLY широкой номенклатуры технологического оборудования ядерного энергоблока, а также значительные потенциальные возможности СОД этого типа, решение задачи идентификации теплогидравлических режимов в ТВС ЯР средствами этой системы принципиально не обеспечивается.

В качестве иллюстрации представим интерфейсные формы представления решения задачи диагностики состояния подшипниковых узлов парового турбоагрегата АЭС в сис-

теме KUS-95 фирмы Siemens (рис.1) и предлагаемом диагностическом комплексе (рис.2). В первом случае указанные данные представляются оператору-диагносту, который на основе визуального анализа спектрального состава диагностического сигнала должен принять диагностическое решение о состоянии контролируемого оборудования. Вполне очевидно, что в случае стремительно развивающейся нештатной ситуации при подобной сложной стохастической спектральной структуре сигнала, адекватно оценить диагностическую обстановку оператор практически не в состоянии.

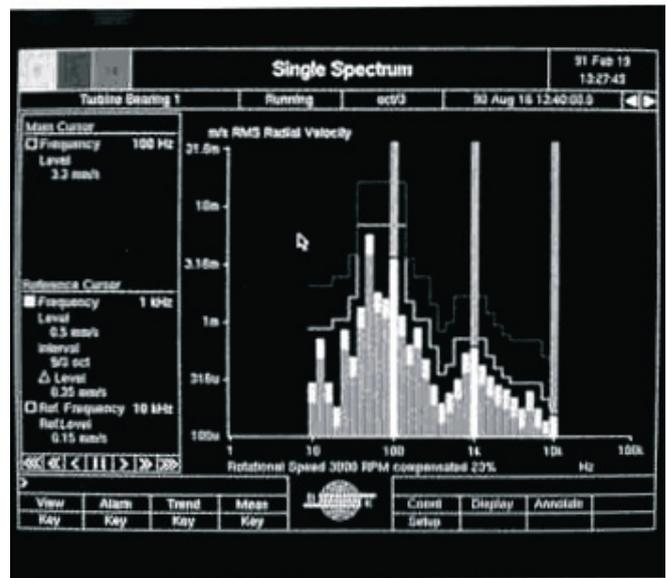


Рис 1. Интерфейсная форма подсистемы оперативного контроля состояния турбоагрегата АЭС для оператора системы KUS-95

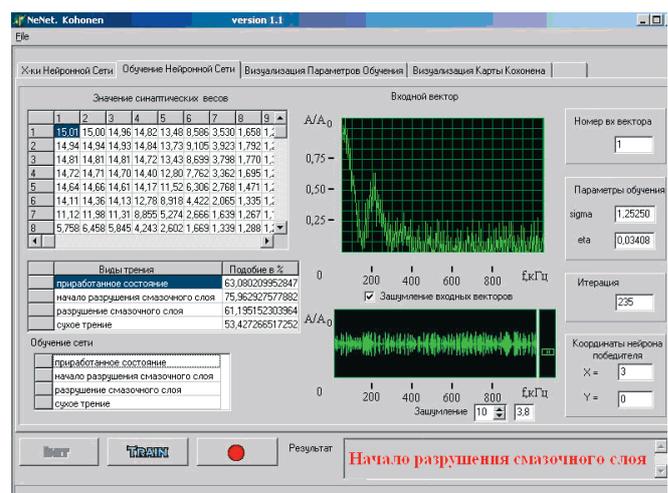


Рис 2. Интерфейсная форма нейросетевого диагностического комплекса для оперативного контроля состояния подшипникового узла турбоагрегата АЭС: представлено диагностическое решение о начале разрушения смазочного слоя в подшипнике скольжения

На рис.2 представлена інтерфейсна форма результату рішення цієї ж задачі на основі искусственной нейронной сети. В отличие от изображенного на рис.1 интерфейса, на основе которого оператор должен эвристически формировать диагностическое решение, экранная форма, представленная на рис.2, уже

содержит такое решение, которое автоматически сформировано описанной выше нейрокомпьютерной системой диагностики. Это решение представляется как заключение о текущем режиме. В данном примере распознано начало разрушения смазочного слоя в подшипнике скольжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый подход к расширению функциональных возможностей применяемых в настоящее время АСУ ТП АЭС, который позволяет автоматически формировать диагностические решения.

2. Разработанный подход обеспечивает

возможность автоматического формирования диагностических решений относительно практически не контролируемых в настоящее время нештатных режимов эксплуатации в элементах и системах ЯЭУ.

1. *Анохин А.Н., Острейковский В.А., Сальников Н.Л.* Системы поддержки оператора АЭС.– Обнинск: Институт атомной энергетики, 1998.– 92 с.
2. *Куприянова И.А.* Автоматизированные средства информационной поддержки оператора при управлении АЭС. Аналитический обзор.– Обнинск: ФЭИ, 1997.–47 с.
3. *Диагностирование неисправностей в ЯЭУ с помощью ИВС.* Реферативный обзор отечественной и зарубежной литературы. – Москва: ВНИИ Центр, 1987. – 178 с.
4. *Шаповалова С.І.* Комп'ютерне моделювання карти самоорганізації для розв'язання задачі розпізнавання сигналів / С.І. Шаповалова, Г.І. Шараєвський // Вісник національного університету "Львівська політехніка" Автоматика, вимірювання та керування. – 2007. – №574. – с.75.–81.
5. *Шаповалова С.И.* Среда моделирования нейронных сетей для решения задач диагностики оборудования АЭС / С.И. Шаповалова, Г.И. Шараевский // Проблемы програмування. – 2008.–№.–3. – с. 675.–678.
6. *Калинушкин А.Е.* Создание экспертных систем для ядерной энергетики / А.Е.Калинушкин, В.И. Митин, Ю.М.Семчинков // Атомная техника за рубежом. – 1990. – Т. 7. – С. 3 – 12.
7. *Фиалко Н.М.* Эволюция подходов к определению начала кипения теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ / Н.М.Фиалко, И.Г.Шараевский, Л.Б.Зимин, Н.О.Меранова // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2007. – Вип. 8. – С. 44 – 50.
8. *Делайе Дж.* Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. / Дж. Делайе, М. Гио, М. Ритмюллер// Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.