

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

УДК 681.5.007:658:621.311.25

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТОПЛИВА АЭС**

*Болтенков В.А., Молина Т.О., Маслов О.В., Первушина О.В., Стецюра А.С.,  
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина*

*Рассмотрены принципы применения интеллектуальных информационных технологий, в частности искусственных нейронных сетей для повышения эффективности диагностических систем АЭС. Приведены результаты исследований применения нейросетевых технологий для диагностики течей и анализа гамма-спектров*

#### **Введение**

Атомные электростанции (АЭС) играют ведущую роль в энергетической отрасли Украины. Если в России доля электроэнергии, вырабатываемой АЭС, составляет 12-13% от национального энергетического баланса, в среднем по странам Евросоюза – примерно одну треть, то в Украине эта доля составляет примерно половину. Таким образом, безопасная и эффективная эксплуатация украинских АЭС без преувеличения является одной из проблем национальной безопасности. Большинство энергоблоков отечественных АЭС, построены по проектам 60-х годов 20-го века. В этих проектах отсутствуют достаточно эффективные штатные системы основной диагностики состояния оборудования, систем и технологических компонентов, за исключением системы диагностики ядерного реактора. Для решения проблемы безопасной и эффективной эксплуатации на украинских АЭС интенсивно внедряются диагностические системы для оперативной диагностики основных технологических объектов и процессов. В силу специфики ядерной энергетической технологии такие диагностические системы могут быть только пассивными: они должны выполнять свои функции во время работы ядерной установки на мощности, без возможности перевода ее в тестовое состояние [1]. Даже системы диагностики ядерного топлива (ЯТ), функционирующие во время перегрузки ядерного реактора (ЯР), могут эксплуатироваться только в режиме сопровождения регламентных технологических операций по перегрузке топлива [2]. В противном случае их применение сопряжено с большими экономическими потерями.

Разрабатываемые в последние годы системы диагностики для АЭС концептуально являются эргатическими, т.е. подразумевают участие человека-оператора. Именно на оператора диагностической системы возлагается проблема принятия решения по результатам мониторинга состояния объекта или процесса [2, 3]. В связи с этим таким системам диагностики присущи все недостатки эргатических систем, кратко формулируемые понятием «человеческий фактор»: обработка больших объемов информации в условиях дефицита времени,

вытекающая из этого повышенная вероятность принятия ошибочного решения, низкая надежность. Поэтому в последнее время делается акцент на создании диагностических систем как средства интеллектуальной поддержки оператора [4] или полного исключения оператора из процесса диагностики.

Целью настоящей статьи являются разработка принципов совершенствования в указанном аспекте диагностических систем АЭС двух направлений: систем бесконтактной акустической диагностики течей в оборудовании и систем диагностики состояния ЯТ по собственному гамма-излучению тепловыделяющих сборок (ТВС). В обоих случаях в качестве базовых интеллектуальных информационных технологий применяются искусственные нейронные сети и построенные на их базе системы распознавания.

### **1. Нейросетевые технологии в системах диагностики течей**

Предложенные системы диагностики течей в оборудовании АЭС [1, 3] – это системы акустического бесконтактного течеискания. Действие систем основано на регистрации акустическими микрофонными датчиками широкополосного звукового сигнала, образующегося в месте дефекта при истечении в окружающую среду теплоносителя, который на рабочих режимах РУ имеет давление до 16 МПа и температуру до 320°C. Разнесенная сеть микрофонных датчиков позволяет локализовать место протечки с точностью до 0,3 м. Однако серьезной проблемой в автоматизации акустического течеискания является обнаружение слабого акустического сигнала от течи на начальном этапе ее образования и развития на фоне интенсивных технологических шумов оборудования энергоблока. Другой проблемой является распознавание типа течи. В частности, в работе [5] экспериментально доказано, что реально в оборудовании АЭС существуют два типа течей – щельные (течи через малый дефект) и фланцевые (течи через неплотности во фланцевых соединениях), – обладающих различными спектральными характеристиками. На рис.1 приведены типичные спектры технологического шума, создаваемого высокооборотными электрическими машинами, и шумовых сигналов от щельной и фланцевой течей.

Для решения указанных задач обнаружения и распознавания типа течей предложена нейросетевая технология. В качестве основы интеллектуальной технологии была выбрана многослойная сеть прямого распространения (многослойный персептрон) [6]. Архитектура сети трехслойная, с логарифмической сигмоидной функцией активации в каждом слое, число входов сети – 1024, число нейронов в скрытом слое выбранное опытным путем – 12, выходной вектор нейронной сети состоит из трех элементов, соответствующих решениям: «только технологический шум», «сигнал щельной течи на фоне технологического шума», «сигнал фланцевой течи на фоне технологического шума». Центральным моментом является выбор алгоритма обучения нейронной сети. Как альтернативный вариант были проанализированы: алгоритм градиентного спуска, алгоритм сопряженного градиента с квазиньютоновским подходом в модификации Мюллера, алгоритм сопряженного градиента в модификации Полана – Рибейры [7]. По критериям минимального числа циклов обучения и мак-

симальной вероятности правильного распознавания в качестве оптимального метода обучения был выбран алгоритм обратного распространения ошибки (back propagation – BP). В качестве обучающего входного вектора использовались 1024 отсчета спектрограммы Уэлча с взвешиванием по Хэммингу акустического сигнала, представляющего собой аддитивную смесь сигналов течей и технологического шума. Аддитивная смесь формировалась из реализаций экспериментально зарегистрированных сигналов от течей различных типов и технологических шумов. При размере обучающей выборки в 25-30 спектрограмм каждого класса сеть успешно обнаруживала и распознавала сигналы от двух видов течей при общем отношении сигнал/шум до -10 дБ. Вероятность правильного распознавания – 96%.

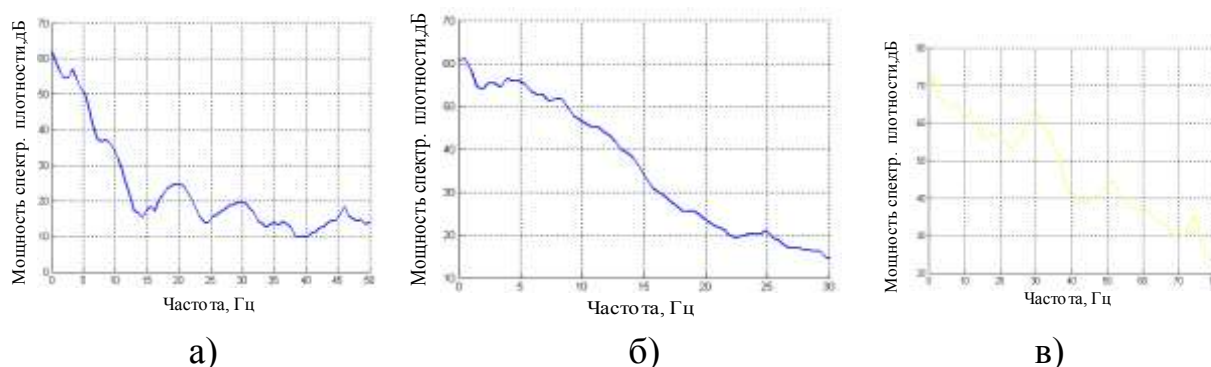


Рисунок 1 – Типичные спектры технологического шума (а) и шумовых сигналов от щельной (б) и фланцевой течей (в)

## 2. Нейросетевые технологии в задачах диагностики ядерного топлива и течей в оборудовании АЭС методами гамма-спектрометрии

В практических задачах диагностики состояния ЯТ АЭС выделяются две подзадачи: (1) оценка глубины выгорания ЯТ, (2) контроль герметичности оболочек (КГО) основного топливного элемента – тепловыделяющей сборки (ТВС) [2]. Ведущей технологией в диагностике ЯТ является регистрация и последующий анализ энергетических спектров собственного гамма-излучения ТВС – гамма-спектрометрия [2]. Гамма-спектрометрия применяется также в диагностике течей оборудования первого контура как альтернативный физический принцип (по современным международным требованиям системы диагностики течей на АЭС должны базироваться как минимум на двух различных физических принципах). В частности, для диагностики течей производится гамма-спектральный анализ воздуха в системе охлаждения верхнего блока ЯР. Целью анализа является выделение пиков полного поглощения изотопов – продуктов активации теплоносителя.

На этапе анализа гамма – спектров наиболее сложной в отношении алгоритмизации и автоматизации является проблема поиска пиков полного поглощения (ППП) изотопов продуктов деления (ПД). Основной практический интерес в задачах диагностики выгорания ядерного топлива представляет поиск хорошо идентифицируемых PPP ПД  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ , в задачах КГО и обнаружения течей – поиск летучих и подвижных изотопов ПД. Обычно задача

выделения ППП, представляющих интерес ПД решается в интерактивном режиме анализа гамма-спектров с участием опытного оператора.

Для автоматизации процесса поиска и принятия решения об их наличии была также предложена нейросетевая технология. Архитектура сети – многослойный персептрон, число слоев – 3, активационная функция – тригонометрическая сигмоидальная. Метод обучения сети – ВР алгоритм. При обучении и испытаниях на вход сети подавались 1024 отсчета энергетического гамма-спектра. Для обучения и испытания сети был использован реальный банк данных гамма-спектров, зарегистрированных на одном из энергоблоков Запорожской АЭС при перегрузке ядерного топлива. Гамма-излучение регистрировалось CdZnTe-детекторами SDP310/LC/20S, энергетические спектры гамма-излучения формировались многоканальным спектральным анализатором MCA-166 и передавались в диагностический компьютер по интерфейсу RS-232 в обрабатывающий компьютер. На рис.2 приведены типичные экспериментальные гамма-спектры в исходном виде (а) и после предварительной обработки, подготовленные для обучения сети (б). После обучения на эталонной выборке объемом 10-12 спектров сконструированная нейронная сеть успешно распознает практически все предъявленные к распознаванию статистически значимые ППП ПД  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$ .

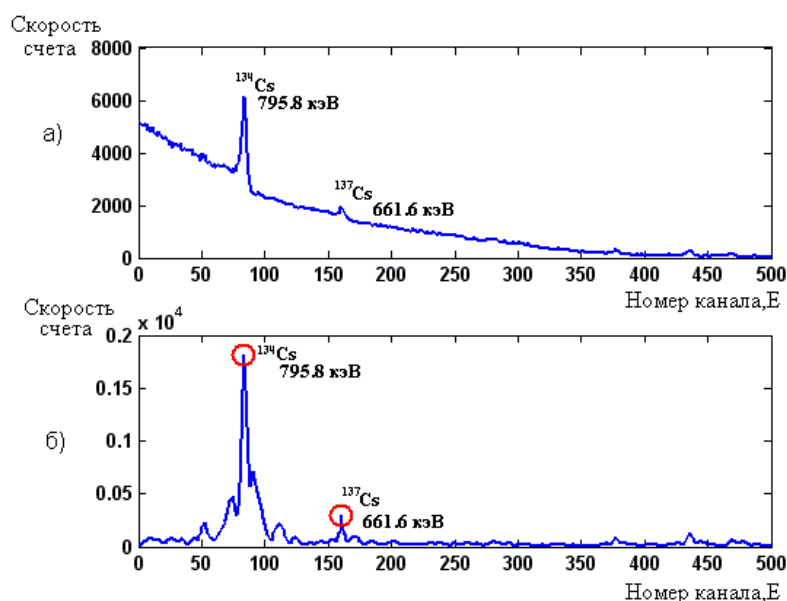


Рисунок 2 – Типичные экспериментальные гамма-спектры в исходном виде (а) и после предварительной обработки, подготовленные для обучения сети (б)

## Выводы

Приведенные в работе результаты исследований показывают перспективность применения интеллектуальных информационных технологий, и в частности, искусственных нейронных сетей для повышения качества систем диагностики оборудования и топлива АЭС.

Нейросетевые технологии являются одним из реальных путей создания полностью автоматических систем диагностики течей в оборудовании и оценки состояния ядерного топлива.

Полученные результаты позволили сформулировать направления дальнейших исследований проблемы. Для нейронных сетей, применяемых для обнаружения и распознавания течей, – это синтез динамических алгоритмов обучения по фоновым технологическим шумам различной природы. Динамическое обучение потенциально заложено в структуру ВР алгоритма обучения как свойство накопления информации в процессе функционирования.

Для нейросетевых технологий, применяемых для анализа гамма-спектров, весьма перспективным является применение нейронных сетей, построенных на нечеткой логике. Такие сети должны существенно повысить качество выделения слабо выраженных (статистически мало значимых) пиков полного поглощения.

### Литература

1. Болтенков В.О., Максимов М.В., Маслов О. В. Принципи побудови діагностичних систем для АЕС на основі нових інформаційних технологій // Праці Шостої Всеукраїнської міжнародної конференції УкрОБРАЗ'2002. Київ. -2002. -С. 207-210.
2. Маслов О.В., Максимов М.В., Олейник С.Г., Болтенков В.А. Диагностика состояния ядерного топлива в реальном времени – технические средства и методическое обеспечение // 14-я ежегодная конференция Ядерного общества России "Научное обеспечение безопасного использования ядерных энергетических технологий". Сб. материалов. Удомля, 2003. С. 244-256.
3. Болтенков В.А., Верпета В.И., Калашников А.Н., Максимов М.В., Маслов О.В. Диагностика протечек теплоносителя на верхнем блоке ВВЭР-100: проблема и пути решения // Атомна енергетика та промисловість України. -1999. -№2(2). -С.51-53.
4. Шараевский И.Г., Письменный Е.Н., Домашев Е.Д., Шараевская Е.И. Возможности совершенствования компьютерных систем контроля АЭС на основе методов искусственного интеллекта // Промышленная теплотехника. 2000. -Т.22. -№1. -С.70-77.
5. Болтенков В.А., Верпета В.И., Королев А.В., Максимов М.В., Орлов В.В. Спектрально-корреляционные характеристики акустических сигналов в автоматизированных системах обнаружения течей на АЭС // Міжнародна конференція з управління "Автоматика-2000". Праці в 7 т. -Львів. -2000. -Т.3. -С.45-51.
6. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: Высшая школа, 2002. – 184 с.
7. Медведев В.С., Потемки В.Г. Нейронные сети в Matlab, М., Диалог – МИФИ, 2002. – 489 с.

<p>Болтенков В.О., Моліна Т.О., Маслов О.В., Первушина О.В., Стецюра О.С. <b>Інтелектуальні інформаційні технології в системах діагностики устаткування та палива АЕС.</b></p> <p>Розглянуто принципи застосування інтелектуальних інформаційних технологій, зокрема штучних нейронних мереж для підвищення ефективності діагностичних систем АЕС. Приведені результати досліджень використання нейромережних технологій для діагностики течій та аналізу гамма-спектрів.</p>	<p>Boltenkov V.O., Molina T.O., Maslov O.V., Pervushina O.V., Stetsjura O.S. <b>The Intelligent Information Technologies in Systems for Diagnostics of NPP Equipment and Fuel.</b></p> <p>Principles of intelligent information technologies application, particularly artificial neural nets, for improvement of NPP diagnostics systems are discussed. Study results of using neural net technologies for leak diagnostics and gamma-spectra analysis are presented.</p>
---	--

Надійшло до редакції  
21 квітня 2004 року