

ШАРАЕВСКИЙ И.Г.<sup>1</sup>,  
ШАПОВАЛОВА С.И.<sup>2</sup>, ШАРАЕВСКИЙ Г.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины “КПИ”

## МЕТОДОЛОГИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДАВАРИЙНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Розроблено ефективні алгоритми розпізнавання (класифікації) випадкових процесів, які після відповідного спектрального перетворення розглядаються як багатомірні випадкові вектори.

Разработаны эффективные алгоритмы распознавания (классификации) случайных процессов, которые после соответствующего спектрального преобразования рассматриваются как многомерные случайные векторы.

Efficient algorithms of random process identification (classification) that after respective spectral transformation are considered as multidimensional random vectors were developed.

$N$  – мерность пространства диагностических признаков;

$\tau$  – время формирования диагностического решения;

кр. – критический;

АкЗ – активная зона;

АСП – автоспектральная плотность;

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

ИНС – искусственная нейронная сеть;

СВРК – система внутриреакторного контроля;

ТАК – термоакустические колебания;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ЯР – ядерный реактор.

В настоящее время термоакустическая колебательная неустойчивость парогенерирующих каналов стала рассматриваться специалистами [1] в качестве одного из главных факторов, ограничивающих форсирование тепловой мощности теплообменных устройств кипящего типа, а также создание использующих эти устройства перспективных образцов новой техники. В особой мере изложенное следует отнести к таким энергонапряженным и ответственным высокофорсированным теплообменным аппаратам, какими являются АкЗ водоохлаждаемых энергетических ЯР. Таковы, в частности, водо-водяные реакторы повышенной безопасности нового поколения. Исследования термоакустических процессов в двухфазных диабатных парожидкостных потоках, основные результаты которых, связанные с высокочастотной колебательной неустойчивос-

тью парогенерирующих каналов (эта неустойчивость в ряде работ, например [2], обозначается ТАК) обобщены в [3], позволяют заключить следующее:

1. Высокочастотная колебательная неустойчивость процесса кипения в парогенерирующих каналах является потенциально опасной теплогидравлической аномалией, возникновение и развитие которой в каналах водоохлаждаемых ЯР способно инициировать аварийный процесс разрушения оболочки ТВЭЛ и выхода высокорadioактивных газообразных продуктов деления в теплоноситель еще при докризисных значениях тепловых потоков  $q < q_{кр}$ , т.е. тогда, когда расчетный запас по КТП в процессе эксплуатации ТВС еще не превышен.

2. Высокочастотную колебательную неустойчивость парогенерирующего канала при фор-

мировании в этом канале пузырьковой структуры двухфазного парожидкостного потока следует рассматривать как один из главных факторов, существенно ограничивающих возможность форсирования мощности ЯЭУ с реакторами ВВЭР, в ТВС которых возможно не только поверхностное кипение теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ, но также и возникновение (при определенных условиях) ТАК.

3. В настоящее время ТАК продолжает оставаться одним из наименее изученных видов колебательной неустойчивости парогенерирующих каналов. При этом:

а) имеет место значительный дефицит надежных экспериментальных данных об условиях возникновения и развития ТАК в двухфазных диабатных парожидкостных потоках, причем сведения относительно областей локализации ТАН весьма противоречивы;

б) отсутствует информация о ряде определяющих характеристик ТАК, в особенности спектральных параметрах этих колебаний;

в) физический механизм разрушения ТВЭЛ в условиях возникновения в парогенерирующем канале ТАН, а также связь, обуславливающая это разрушение с параметрами ТАК, до настоящего времени не установлены;

г) методы оперативного обнаружения и автоматического распознавания ТАК в процессе эксплуатации АкЗ водоохлаждаемых ЯР до настоящего времени не разработаны.

4. Вероятностные внутренние характеристики процесса генерации паровой фазы (частота отрыва, скорость роста и геометрические размеры паровых пузырей), а также тесно связанные с ними и обусловленные этими характеристиками флуктуационные составляющие сигналов датчиков ряда режимных и технологических параметров процесса теплообмена, а именно: давления, гидравлического сопротивления, нейтронного потока в АкЗ водоохлаждаемых ЯР, — содержат значимую диагностическую информацию о характере фазового перехода на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ.

5. При решении комплекса проблемных задач автоматического распознавания предаварийных и аномальных теплогидравлических процессов в ТВС энергетических ЯР на основе анализа технологических шумов РУ наиболее информа-

тивными являются спектральные параметры флуктуационных составляющих сигналов ряда диагностических датчиков, в особенности динамического давления, пульсаций гидравлического сопротивления парогенерирующего канала, а также флуктуаций нейтронного потока в АкЗ реакторов водо-водяного типа.

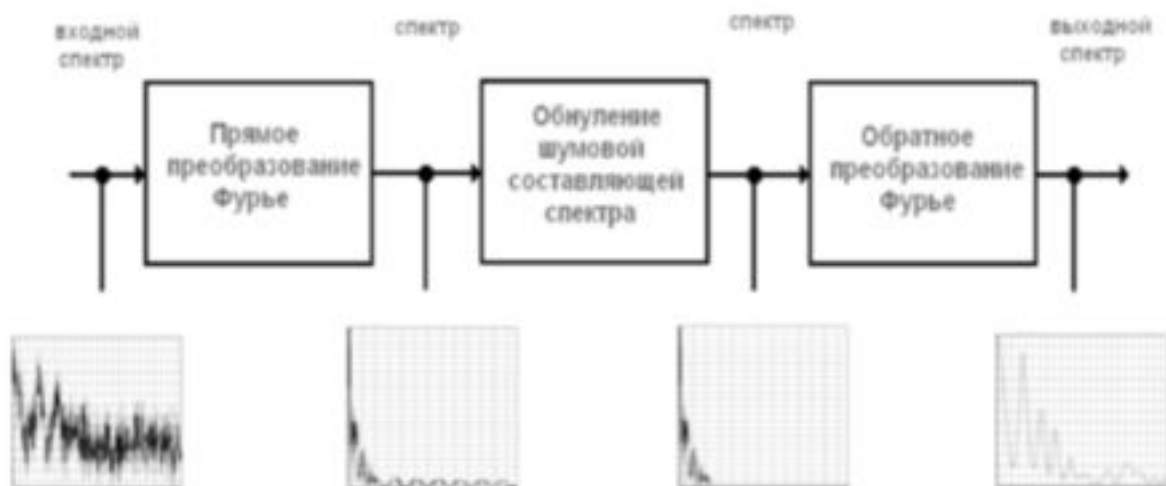
6. Методы нейроинформатики с использованием ИНС [4] являются эффективным средством распознавания ТАК и могут быть использованы при решении задач раннего обнаружения высокочастотной колебательной неустойчивости в ТВС водоохлаждаемых ЯР [3].

7. Предложенный в [5] подход к решению задачи раннего автоматического обнаружения ТАК в АкЗ реактора ВВЭР по параметрам нейтронного шума, регистрируемого в ТВС ЯР, усложнен тем, что подлежащие идентификации режимы ТАК являются случайными объектами, в силу чего для их распознавания эффективно могут быть использованы некоторые из топологий ИНС, в частности, нейронная сеть Хэмминга [6].

Вместе с тем практическая реализация методологии ИНС [4, 6] применительно к задаче распознавания ТАК [3] требует предварительной разработки ряда вычислительных процедур предобработки диагностического сигнала, которые принципиально должны обеспечить не только оптимизацию собственно процедуры распознавания информационно значимых спектральных компонент диагностируемого сигнала, но также и возможность его эффективного выделения на фоне случайных помех. Выработке принципиальных подходов, а также практической реализации указанных проблемных вопросов и посвящена настоящая работа. В ней предложены и реализованы:

— Оптимизационный подход к уменьшению размерности подлежащего распознаванию входного многомерного вектора диагностического сигнала (в данном случае этим вектором является АСП нейтронного шума). Результатом указанной процедуры является определение минимального количества нейронов входного слоя ИНС, которые могут обеспечить высокую надежность правильной идентификации входного вектора неизвестной принадлежности.

— Процедуры предобработки диагностического сигнала, обеспечивающие возможность



*Рис. 1. Схема цифровой обработки диагностического вектора.*

снижения присутствующего во входном нейтронном диагностическом сигнале АкЗ технологических шумов ЯР, которые не связаны с процессом генерации паровой фазы и, следовательно, не являются информационно значимыми в задаче распознавания режима возникновения ТАК в ТВС. Результатом указанной процедуры является повышение надежности правильной идентификации АСП нейтронного шума, характеризующего, наряду с процессами фазового перехода при кипении на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ, также и условия возникновения ТАК.

С учетом вышеизложенного сущность оптимизационного подхода к задаче распознавания случайного диагностического вектора состоит в следующем.

Постановка задачи распознавания режимов трения и ее формализация для нейронной сети приведена в [3].

На вход нейронной сети подается вектор из 242 значений, представляющий сглаженный диагностический сигнал. В поставленной задаче диагностируемый сигнал — это нормированный амплитудно-частотный спектр нейтронного шума.

Выходом является идентификатор наиболее вероятного теплогидравлического режима ТВС.

Множество распознаваемых классов составляют следующие режимы теплообмена на поверхности ТВЭЛ:

- конвективный;
- начала кипения;

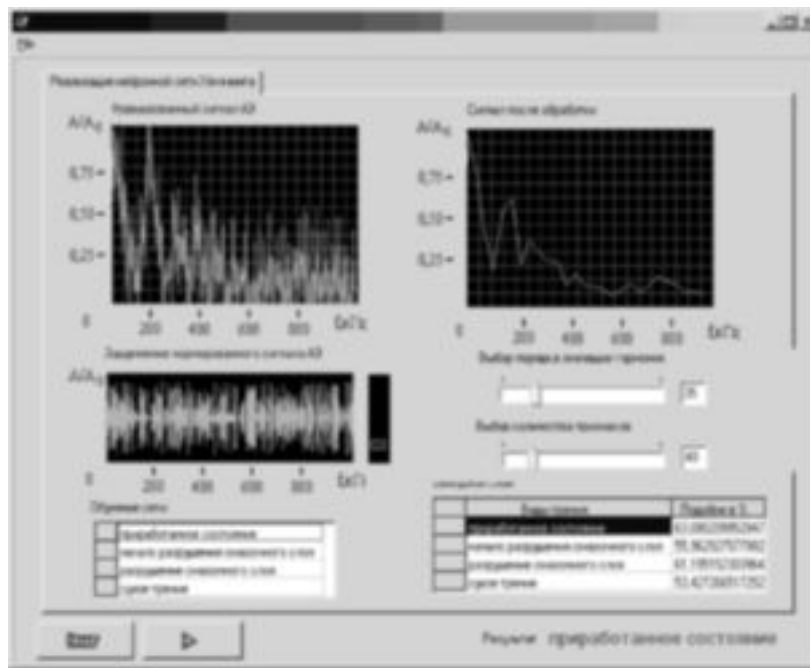
- пузырьковой структуры потока;
- возникновения ТАК.

Сокращение размерности сигнала заключается в уменьшении количества дискретных значений, его определяющих. Уменьшение размерности входного вектора нейронной сети влечет уменьшение количества вычислительных операций, необходимых для распознавания, следовательно, и времени реализации этой задачи.

Таким образом, необходимо определить минимальное количество разбиений сглаженного сигнала, которое позволяет корректно определить режим теплообмена на поверхности ТВЭЛ.

Стандартная предобработка сигнала фактически представляет собой реализацию цифрового фильтра низких частот. Этапы предобработки сигнала приведены на рис.1. Прямое преобразование Фурье позволяет получить частотный спектр исходного сигнала. На следующем этапе обнуляются его малоинформативные высокочастотные спектральные составляющие. В результате обратного преобразования Фурье получаем сглаженный сигнал — сигнал без высокочастотной составляющей. Исходный и сглаженный сигналы имеют одну и ту же размерность.

Далее в настоящей работе представлены результаты моделирования нейронной сети с целью уменьшения количества ее входов. Для достижения поставленной цели была создана система моделирования работы нейронной сети, в которой помимо искусственной сети Хэмминга ре-



**Рис. 2. Интерфейсная форма сети Хэмминга с параметрами объекта диагностики.**

лизованы все этапы полной предобработки сигнала (рис. 2).

Моделирование осуществляется за счет варьирования следующих параметров:

- уровня шума относительно максимальной амплитуды;
- порядка значащих гармоник;
- размерности сокращенного диагностического сигнала.

Минимизация последнего из указанных показателей является конечной целью соответствующего вычислительного эксперимента, в ходе которого поочередно изменяются этот и другие параметры при условии обеспечения стопроцентного распознавания режима теплообмена. В указанных вычислительных экспериментах преднамеренно вводился завышенный уровень зашумленности, составляющий до 40% от максимальной амплитуды самого сигнала, что заведомо превышает стандартную зашумленность полезного сигнала высокочастотными шумовыми составляющими технологических шумов, которые не связаны с процессом генерации паровой фазы. В качестве иллюстрации этапов предобработки вышерассмотренного диагностического сигнала нейтронного шума на рис. 2 представлена разработанная в настоящей работе интер-

фейсная форма программно реализованного авторами автоматического компьютерного распознавателя на основе ИНС с топологией Хэмминга [6].

Для оценивания эффекта от сокращения количества нейронов входного слоя нейронной сети была введена относительная временная характеристика. За единицу принято время распознавания исходного сигнала размерности 242. Вычислительные эксперименты показали, что в данной прикладной задаче время надежного распознавания можно сократить примерно в 4 раза, обеспечивая тем самым компьютерную идентификацию неизвестных реализаций нейтронного шума в онлайн-режиме, т.е. в масштабе реального времени.

По результатам выполненных вычислительных экспериментов получена представленная ниже таблица, которая характеризует условия сохранения 100% надежности распознавания при различных уровнях зашумленности подлежащего распознаванию диагностируемого вектора и уменьшении мерности пространства используемых при распознавании признаков.

На рис. 3 представлена полученная в ходе вычислительных экспериментов зависимость нормированного времени формирования диагностических решений от размерности входного

Таблица. Условия функционирования сети Хэмминга при сохранении 100% надежности распознавания режима теплообмена

№ п/п	Уровень шума	Размерность входного вектора	Относительная временная характеристика
1	10	242	1
2	15	210	0,89
3	20	178	0,71
4	25	142	0,59
5	30	108	0,45
6	35	74	0,33
7	40	40	0,25

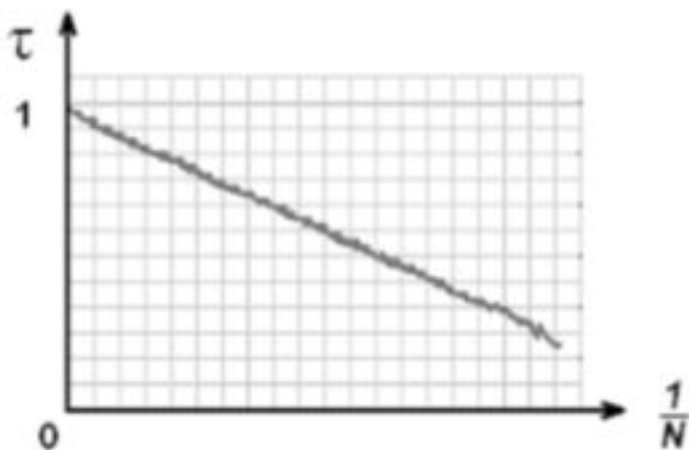


Рис. 3. Зависимость нормированного времени формирования диагностических решения от размерности признаков пространства.

диагностического вектора нейтронного шума. Представленные на этом рисунке экспериментальные данные свидетельствуют о том, что оптимизированный на основе реализованного в настоящей работе подхода диагностический сигнал существенно сокращает время распознавания нейронной сетью в структуре перспективной системы СВРК реального времени (рис. 3).

### Выводы

1. Программно реализованная в настоящей работе ИНС обеспечила 100% надежность распознавания потенциально опасного предаварийного режима ТАК в АкЗ водо-водяного ЯР по параметрам нейтронного шума, измеренного штатной СВРК ядерного энергоблока.

2. На основе нейронной сети Хэмминга разработана программная система моделирования минимально достаточного количества дискретизаций отфильтрованного диагностического сигнала для надежного распознавания теплогидравлических режимов в ТВС энергетического ЯР водо-водяного типа.

3. Разработанное математическое и программное обеспечение для компьютерного комплекса штатной СВРК реактора ВВЭР позволяет его эффективно использовать в качестве интеллектуального диагностического модуля этого комплекса с целью автоматического распознавания высокочастотной колебательной неустойчивости в ТВС в процессе эксплуатации этих реакторов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев А.И., Федоров В.А., Мильман О.О. Новые направления исследований теплообмена при создании современных энергетических установок // Тр. 2-й Российской национальной конференции по теплообмену. Т.1. – М.: Изд. МЭИ, 1998. – С. 59–63.
2. Герлига В.А., Скалозубов В.И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании ФЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
3. Долинский А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М., Басок Б.И. Методология распознавания и верификации кризисов теплоотдачи в стержневых сборках // Пром.теплотехника. – 2005. – Т.27, № 6. – С. 66–80.
4. Luger G. Artificial intelligence. – Addison Wesley, UK. – 2002. – 864 p.

- 
5. *Sharaevskij I.* A methodology for discerning incipient boiling of the coolant in a water-moderated, water-cooled (pressurized-water) nuclear reactor by means of the Bayesian neutron-noise classifier // Proc/ 14-th Intern. Conf. on Nuclear Engineering (Icône-14) July 17-20, 2006, Miami, Flo, USA, Paper ICONE 14-89630 – 8 p.
6. *Lippman R.* An introduction to computing with neural nets // JEEE ASSP Magazine. – 1987. – №4. – P. 4–22.