

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕЧИ ТРУБОПРОВОДОВ ВВЭР

А.О. Скоморохов*, А.А. Кудряев, С.А. Морозов****

** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ», г. Обнинск*

*** ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Статья посвящена диагностированию аномальных ситуаций, связанных с потерей теплоносителя в первом контуре реакторов ВВЭР. Приведены результаты исследований, проведенных при внедрении системы диагностирования течей на КАЭС. Рассмотрены множественные полиномиальные модели для фильтрации сигналов в системе акустического контроля течи трубопроводов ВВЭР, направленные на снижение вероятности ложных срабатываний системы. Предложен нейросетевой алгоритм диагностирования течи.

Ключевые слова: диагностика, акустические шумы, течь, ВВЭР, МГУА, нейронная сеть.

Key words: diagnostics, acoustics noise, leakage, PWR, GMDH, neural network.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль герметичности оборудования первого контура (второй барьер безопасности) представляет собой важнейшую задачу обеспечения безопасности эксплуатации АЭС. Для диагностирования аномальных ситуаций, связанных с потерей теплоносителя первого контура, разрабатываются системы, основанные на контроле влажности и акустических шумов при течи.

Акустический шум, возникающий при истечении жидкости под высоким давлением, является источником информации о факте разгерметизации контуров циркуляции реакторных установок типа ВВЭР. Базирующиеся на этом эффекте акустические методы диагностики являются быстродействующими и, в принципе, позволяют оценить величину и координату течи.

В ГНЦ РФ-ФЭИ разработана и введена в опытную эксплуатацию на третьем блоке Калининской АЭС с реактором ВВЭР-1000 акустическая система контроля течей теплоносителя (САКТ) [1]. При внедрении САКТ были выявлены помехи, превышающие порог срабатывания системы. Это привело к необходимости решать задачи исследования источников акустических шумов, разработки методов фильтрации сигналов и алгоритмов принятия решений в системе обнаружения течей.

Для выявления источников шумов проводился анализ авто- и взаимных корреляционных функций, кластерный и факторный анализ акустических сигналов. Как показано в [2], при работе реактора ВВЭР-1000 на мощности существует пять технологических источников шумов (общереакторный и локально-петлевые).

© А.О. Скоморохов, А.А. Кудряев, С.А. Морозов, 2010

В работе рассмотрены задачи выявления взаимосвязей сигналов системы акустического контроля течей, предсказания поведения сигналов с использованием метода группового учета аргументов и принятия решений по диагностике течи на основе нейросетевого алгоритма.

СИСТЕМА АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕЧЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ ВВЭР

Система САКТ включает в себя 53 акустических датчика, блоки сбора информации и коммутационные линии. На каждой из четырех петель первого контура РУ ВВЭР-1000 установлено по восемь контактных акустических датчиков волноводного типа (по три – на участках реактор-ГЦН и ГЦН-парогенератор; по два – на участках реактор-парогенератор). Такие же датчики были размещены на корпусе компенсатора давления (4 шт.), на трубопроводе впрыска (4 шт.) и на соединительном трубопроводе системы КД (3 шт.). Четыре датчика установлены на трубопроводе сброса и на импульсных предохранительных клапанах системы КД; шесть датчиков – на трубопроводах САОЗ. Схема РУ и расположения датчиков представлена на рис. 1. Будем ссылаться на участки петель от парогенератора до реактора и от парогенератора, через ГЦН, до входа в реактор как на «горячие» и «холодные» участки.

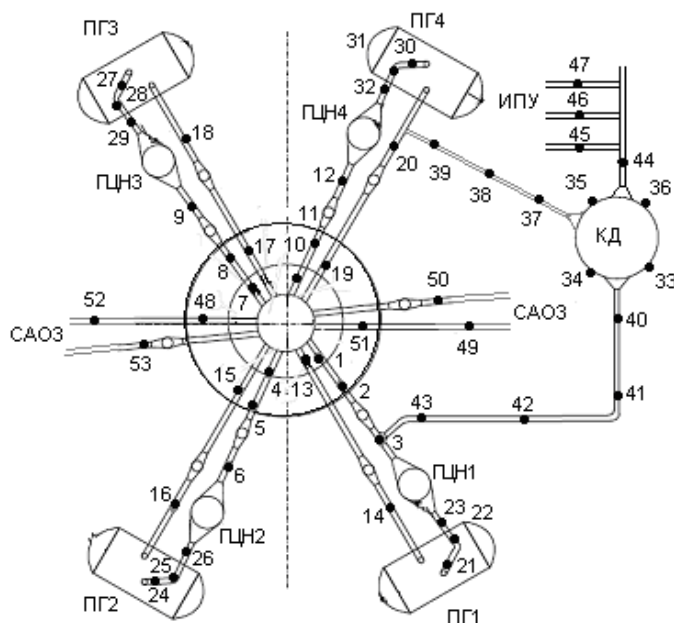


Рис. 1. Распределение акустических датчиков системы САКТ на трубопроводах ГЦК и вспомогательных систем третьего блока КАЭС

В настоящей статье рассмотрены 32 акустических датчика системы САКТ, установленных на трубопроводах четырех петель реактора. Обозначим a_{ij} j -ый датчик ($j = 1, \dots, 8$), находящийся на i -ой ($i = 1 \dots 4$) петле. Расположение датчиков представим матрицей

$$\begin{bmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{18} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{28} \\ a_{31}, a_{32}, \dots, a_{38} \\ a_{41}, a_{42}, \dots, a_{48} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Нумерация внутри петли идет против направления движения теплоносителя (вход в реактор, ГЦН, ПГ, выход из реактора). Все датчики определенной петли будем обозначать вектором

$$\mathbf{a}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})', \quad (2)$$

где «'» – знак транспонирования, i – номер петли.

Для краткости будем использовать обозначения a_{ij} и \mathbf{a}_i как для датчиков, так и для временных процессов $a_{ij}(t)$ (сигналов с этих датчиков).

ФИЛЬТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Отличительной особенностью реакторной установки как источника акустических шумов является сложность и взаимосвязанность протекающих в ней процессов: механических, гидродинамических, вибрационных, ударных, генерации и барботажа пара и т.д. Все это порождает множество акустических источников, действующих в различных диапазонах частот, зависящих от режима реакторной установки, состава действующего оборудования и многих других факторов. Естественно, без изучения статистических характеристик этих шумов и установления их основных источников невозможно надеяться на успешное решение задачи обнаружения протечек теплоносителя.

На рисунке 2а представлен пример акустического сигнала в системе САКТ в присутствии помех (частота оцифровки 1 раз в минуту).

Минимальная течь, подлежащая обнаружению, составляет 4 кг/мин, что соответствует показаниям датчика порядка 100 мкВ. Из рисунка 2а видно, что наличие помех приводит к многократным превышениям порога выявления течи, т.е. к ложным срабатываниям. Причем речь идет не об одиночных выбросах, а о сплошных временных отрезках длиной до 100 точек.

Сильная корреляция сигналов (коэффициент корреляции 0.97–0.99) в присутствии общей помехи позволяет представить каждый сигнал в виде

$$a(t) = q(t) + \delta(t), \quad (3)$$

где $q(t)$ – общая помеха, а $\delta(t)$ – случайный шум, специфичный для каждого датчика. Задачей фильтрации является оценивание неизвестной функции $q(t)$ и ее последующее вычитание из сигнала $a(t)$. Тогда сигнал течи необходимо будет обнаруживать на фоне случайных шумов $\delta(t)$, которые намного меньше помехи $q(t)$. Поскольку процесс $q(t)$ является общим для всех сигналов, можно описывать каждый сигнал как функцию сигналов других датчиков. Эта задача может быть решена методом группового учета аргументов [3].

Вероятность появления течи трубопроводов сразу двух петель очень мала, поэтому, пользуясь зависимостью между сигналами датчиков разных петель, можно предсказать сигнал датчика одной петли по сигналам датчиков, расположенных на других петлях, например, для сигналов датчиков первой петли с помощью зависимостей вида

$$a_i(t) = f_i(a_9(t), a_{10}(t), \dots, a_{32}(t)), \quad i = 1, 2, \dots, 8. \quad (4)$$

Ошибка предсказания $\delta(t)$ в отсутствие течи будет представлять собой шум, свободный от общих помех и имеющий математическое ожидание, равное нулю.

Отметим серьезное методическое затруднение, связанное с применением модели (4). Появление течи приведет, естественно, к рассогласованию модели. Однако это произойдет как при течи моделируемой петли (датчик a_i), так и при течи по любой другой петле (датчики a_9 – a_{32}). Механизм установления подлинной причины рассогласования в данном случае отсутствует. Далее описана видоизмененная задача фильтрации, решение которой позволяет обойти выявленное затруднение.

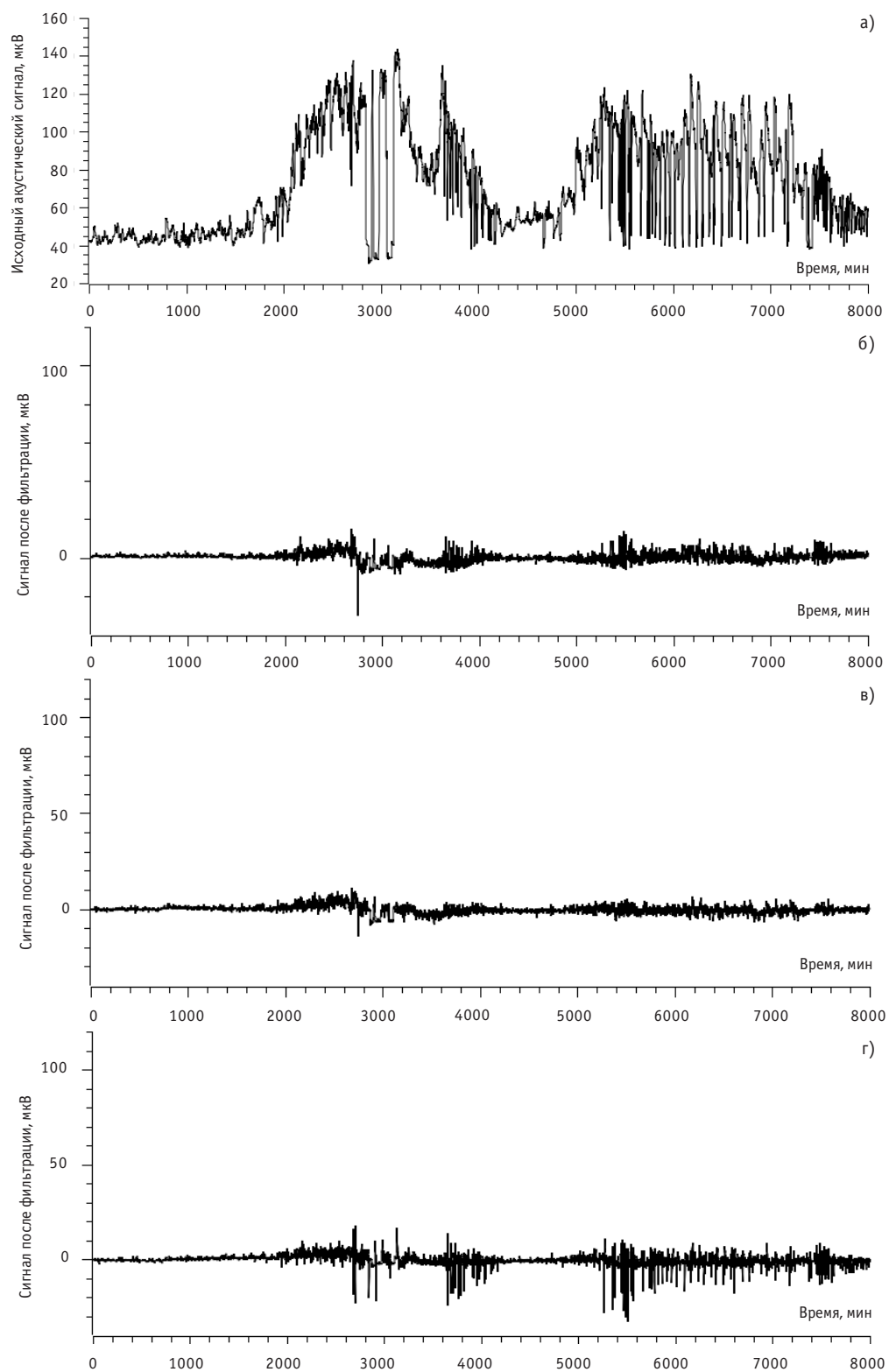


Рис. 2. Фильтрация по каждой петле отдельно: а) – исходный сигнал; б) – фильтр по петле 2; в) – фильтр по петле 3; г) – фильтр по петле 4

МНОЖЕСТВЕННЫЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

Для устранения помех были разработаны фильтры, основанные на применении алгоритма МГУА [3] и программ [4]. Для каждого сигнала a_{ij} были построены три зависимости, отдельно от всех сигналов a_{kj} , сторонних $k \neq i$, по отношению к данному датчику, петель. Например, для сигналов датчиков второй петли необходимо восстановить 8×3 зависимости вида

$$\begin{cases} a_{21} = \phi_1(a_1), & a_{21} = \phi_1(a_3), & a_{21} = \psi_1(a_4) \\ a_{22} = \phi_2(a_1), & a_{22} = \phi_2(a_3), & a_{22} = \psi_2(a_4) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{28} = \phi_8(a_1), & a_{28} = \phi_8(a_3), & a_{28} = \psi_8(a_4) \end{cases} \quad (5)$$

При построении моделей МГУА из 98458 имеющихся измерений было случайно выбрано 10000 точек. Эта выборка делилась на обучающую (6000 точек) и проверочную (4000 точек) выборки. Изменение ошибки предсказания в процессе обучения моделей МГУА представлено на рис. 3

Результаты фильтрации, с использованием моделей вида (5) представлены на рис. 26–г.

Точность предсказания всех полученных моделей представлена в табл. 1 а распределение ошибок приведено на рис. 4. Элемент σ_{ij} на пересечении i -ой строки и j -ого столбца таблицы содержит среднеквадратичную ошибку на проверочной последовательности для датчика a_{ij} . Для краткости в таблице представлено общее значение, посчитанное по объединенной выборке предсказаний по каждой из трех моделей. Общее среднеквадратичное отклонение для всех 32-х датчиков составило $\sigma = 1,18$ мкВ, что позволяет понизить порог обнаружения.

Столбцы 7 и 8 табл. 1 содержат значения для датчиков, установленных на горячих участках трубопроводов всех четырех петель. Для этих датчиков ошибка предсказания заметно меньше, чем для всех остальных, что объясняется их высокой вза-

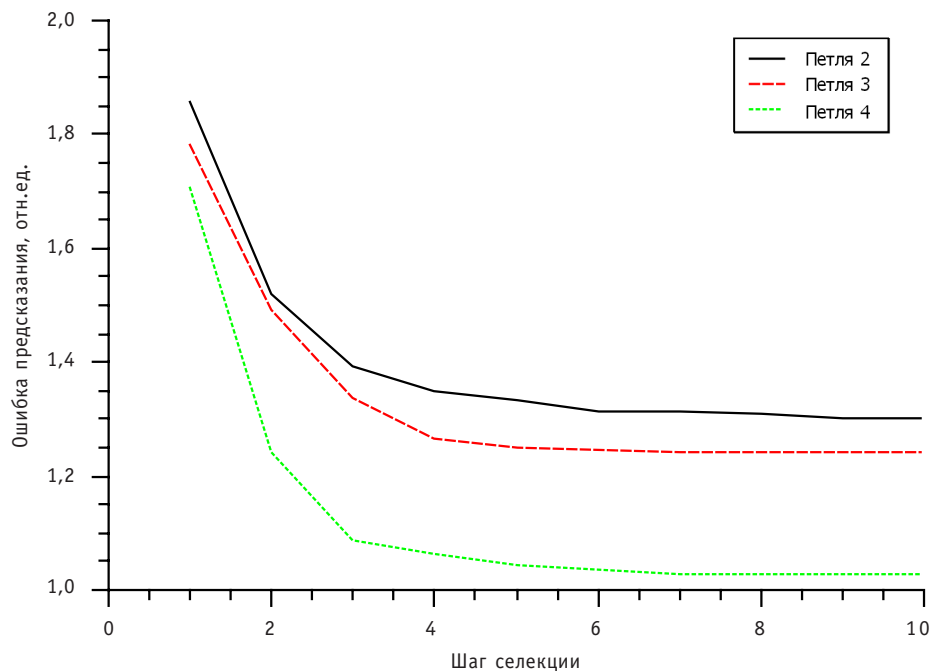


Рис. 3. Изменение ошибки в процессе обучения

Таблица 1

Точность моделей МГУА, мкВ

Номер петли	Номер датчика							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.09	1.55	1.11	1.07	1.27	1.52	0.20	0.22
2	1.58	1.20	2.29	1.64	0.60	0.76	0.30	0.30
3	1.40	1.44	2.25	1.44	1.30	1.34	0.45	0.22
4	0.51	0.82	1.16	0.91	1.22	1.10	0.21	0.30

имной корреляцией [2]. Взаимная связь сигналов датчиков с холодных участков разных петель слабее, что определяется демпфирующим влиянием парогенераторов. Соответственно, по этим датчикам наблюдается относительно большая ошибка предсказания сигналов.

В большинство моделей при селекции было отобрано шесть или семь переменных из восьми.

При пороге, равном 25 мкВ, наблюдалось всего три случая (из 8000 наблюдений) превышения уставки всеми тремя датчиками одновременно (< 0.04%), причем все они были разнесены по времени. Таким образом, переход к определению местоположения течи может происходить при превышении сигналами трех датчиков порога 25 мкВ два раза подряд, что практически невозможно в отсутствие течи.

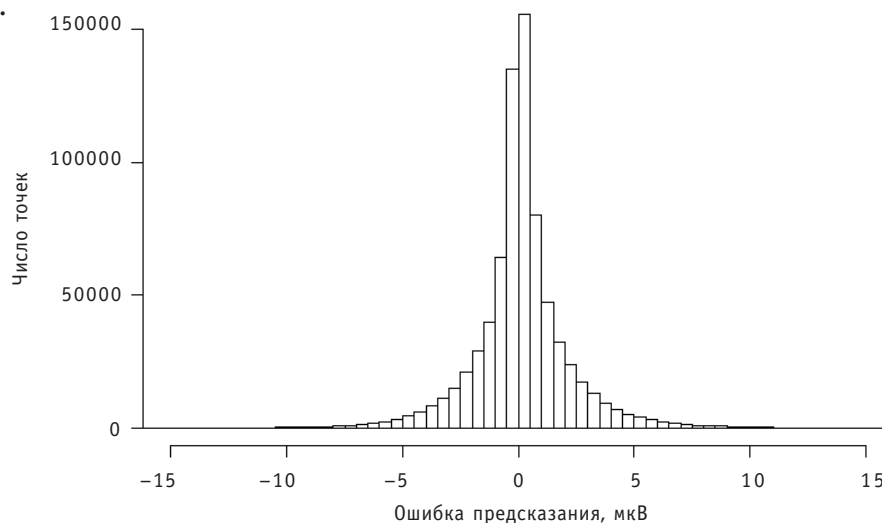


Рис. 4. Совместная гистограмма ошибок предсказания по всем датчикам

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В качестве диагностических признаков использовались рассогласования измеренных и предсказанных значений акустического шума δ_{ij}^k вида

$$\begin{cases} \delta_{21}^1 = a_{21} - \phi_1(a_1), & \delta_{21}^2 = a_{21} - \phi_1(a_3), & \delta_{21}^3 = a_{21} - \psi_1(a_4) \\ \delta_{22}^1 = a_{22} - \phi_2(a_1), & \delta_{22}^2 = a_{22} - \phi_2(a_3), & \delta_{22}^3 = a_{22} - \psi_2(a_4) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \delta_{28}^1 = a_{28} - \phi_8(a_1), & \delta_{28}^2 = a_{28} - \phi_8(a_3), & \delta_{28}^3 = a_{28} - \psi_8(a_4) \end{cases} \quad (6)$$

Рассогласования вычислялись для каждого датчика $j = 1, 2, \dots, 8$, по каждой петле

$i = 1, 2, 3, 4$ и по трем разным моделям $k = 1, 2, 3$. Таким образом, общее число диагностических признаков составит $4 \times 8 \times 3 = 96$. Структура вычислений представ-

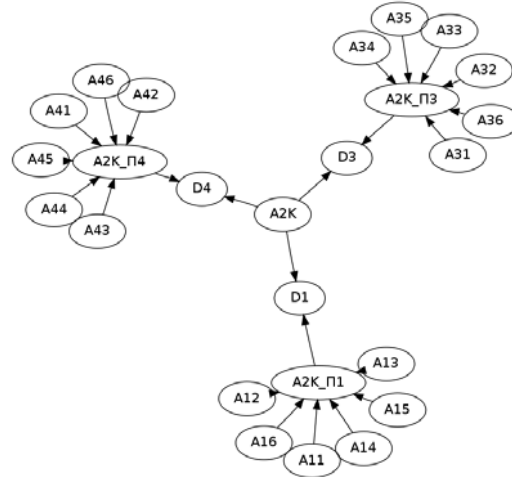


Рис. 5. Структура вычисления признаков $\delta^1, \delta^2, \delta^3$ для датчика a_{2k}

лена на рис. 5.

В случае появления сигнала от течи в показаниях, например, датчика a_{2k} , эти показания увеличатся на некоторую величину Δ , также изменится и значение соответствующих диагностических признаков:

$$\begin{cases} \delta_{2k}^1 = a_{2k} - \phi_k(a_1) + \Delta \\ \delta_{2k}^2 = a_{2k} - \varphi_k(a_3) + \Delta \\ \delta_{2k}^3 = a_{2k} - \psi_k(a_4) + \Delta \end{cases} \quad (7)$$

Кроме прямого влияния течи (7) на диагностические признаки имеет место и косвенное влияние, т.к. изменятся значения всех признаков, в вычислении которых участвовали датчики второй петли, например,

$$\begin{cases} \delta_{1k}^1 = a_{1k} - \phi_k(a_2 + \Delta_2) \\ \delta_{3k}^2 = a_{2k} - \varphi_k(a_2 + \Delta_2) \\ \delta_{4k}^3 = a_{3k} - \psi_k(a_2 + \Delta_2), \end{cases} \quad (8)$$

где вектор $\Delta_2 = (\Delta_{21}, \Delta_{22}, \dots, \Delta_{28})'$ такой, что $\Delta_{2j} > 0$, если датчик a_{2j} чувствует течь, и $\Delta_{2j} = 0$ – в противном случае.

Признаком появления течи является превышение абсолютным значением рассогласования некоторого порога $|\delta| > \gamma$. Обозначим значения диагностического признака как 1 для $|\delta| > \gamma$ и 0 для $|\delta| \leq \gamma$ (логические «ИСТИНА» и «ЛОЖЬ»).

Пример значений диагностических признаков для течи на холодном участке трубопровода первой петли при срабатывании датчиков a_{11}, a_{12}, a_{13} приведен в табл. 2.

Для распознавания комбинаций сигналов, соответствующих различным местам течи и срабатыванию различных датчиков, была разработана нейронная сеть обратного распространения, структура которой приведена на рис. 6.

На вход сети поступают 96 сигналов рассогласования вида (7) и (8). Скрытый и выходной слои сети имеют по пять элементов. При работе сети диагноз определяется по выходному элементу с максимальным значением. Первый элемент выхода сети соответствует диагнозу «норма» и четыре оставшихся – течи трубопрово-

Таблица 2

**Пример значений
диагностических признаков**

Датчик	1	2	3	4
Петля 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	0 0 0
Петля 2	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0
Петля 3	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0
Петля 4	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0
Датчик	5	6	7	8
Петля 1	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
Петля 2	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0
Петля 3	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0
Петля 4	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0

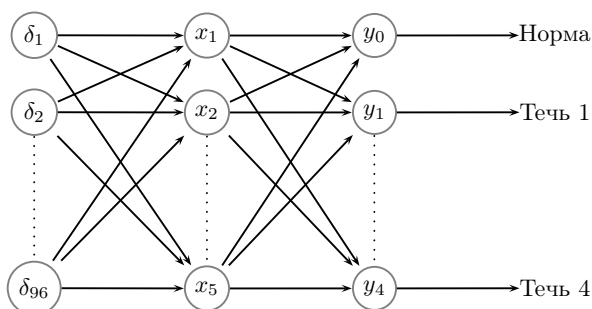


Рис. 6. Структура нейронной сети диагностирования

да соответствующей петли реактора.

В качестве обучающей выборки использовались результаты моделирования (по типу представленного в табл. 2) течей на разных петлях реактора, местах петли при обнаружении течи различными наборами датчиков. Для обучения нейронной сети использовалась программа [5] для среды Kdb+ [6]. Выбор среды реализации

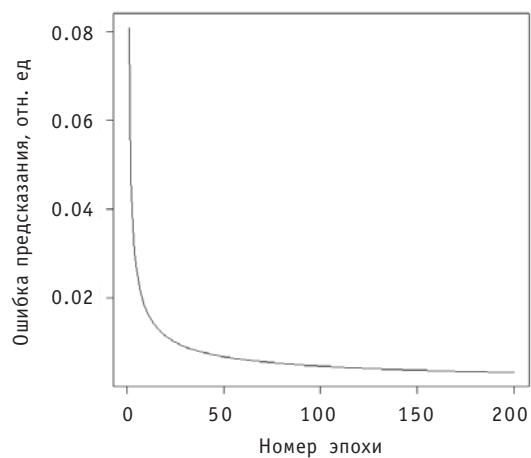


Рис. 7. Ход процесса обучения

обусловлен необходимостью использования для реализации алгоритмов контроля течи технологии потоков данных, которая была рассмотрена в работе [7].

Изменение ошибки распознавания в процессе обучения нейронной сети представлено на рис. 7. Общая схема принятия решений представлена на рис. 8. После определения петли с течью более точное нахождение места течи проводится по показаниям сработавших датчиков этой петли.

ВЫВОДЫ

При разработке алгоритма обнаружения и определения местоположения течи использован оригинальный подход, основанный на совместном использовании множественных полиномиальных моделей и нейронной сети обратного распространения.

С использованием метода группового учета аргументов построены множественные полиномиальные модели фильтрации акустических шумов при обнаружении сигнала течи, позволяющие уменьшить число ложных срабатываний системы.

Нейросетевой алгоритм позволил провести распознавание комбинаций сигналов, соответствующих течи трубопроводов разных петель реактора и разным наборам датчиков, реагирующих на течь.

Полученные результаты используются в системе,

работающей на Калининской АЭС.

Литература

1. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А. и др. Система акустического контроля течей (САКТ)/Препринт ФЭИ-3082. – Обнинск: ФЭИ, 2006. – С. 24.
2. Скоморохов А.О., Белоусов П.А., Морозов С.А. Кластерный анализ сигналов системы акустического контроля течей//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №4. – С. 3-12.
3. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: Наукова думка, 1982.
4. Skomorokhov A.O. Adaptive learning networks in APL2//APL Quote Quad. – 1993. – V. 24. – № 1. – P. 219-229.
5. Skomorokhov A. Neural network implementation in K. <http://nsl.com/k/nnn.k>.
6. Kdb+ database and q-programming language. – <http://kx.com/>. <http://kx.com/>.
7. Белоусов П.А., Скоморохов А.О. Разработка и применение методов обнаружения изменения свойств и прогнозирования временных рядов в задачах диагностирования АЭС//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №3. – С. 3-12.

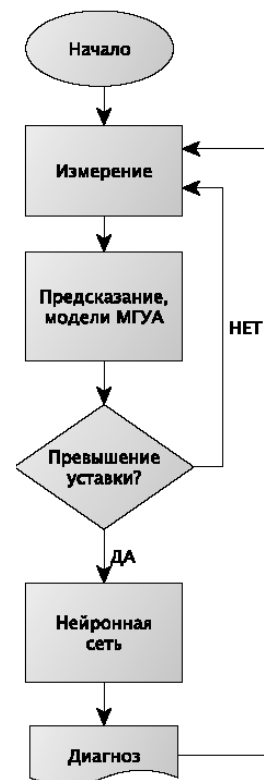


Рис. 8. Общая схема принятия решений

Поступила в редакцию 25.10.2010

presence of the «small» trap resulted in the evaluation of the neutron flux density, maximal coefficients of heat rate non-uniformity, reactivity and duration of the SM run. The proposed arrangement has been implemented and materials have been irradiated in the «small» trap for the last 1.5 years of the SM operation.

УДК 621.039.56

Change of the SM Reactor Core Characteristics under the Variation of the Control Rods Arrangement \ A.V. Klinov, V.A. Starkov, Yu.B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 6 titles.

The results of neutron-physical calculations of the SM reactor characteristics under various control rods arrangement are presented. Two most intensive reactor campaigns were considered to obtain the dependence of the non-uniformity coefficient of the heat rate distribution over the FA cross-section as well as thermal flux density on the fuel rod surface and thermal neutron flux density vs. the mutual arrangement of the central shim rod (CSR) and periphery shim rods (SR). The dependence of fluence and thermal flux density on the sequence of the control rods removal has been studied as well.

УДК 621.039.517

Change of the Heat Rate Distribution in the SM Reactor Core during its Refueling and Campaigns \ A.V. Klinov, V.V. Pimenov, V.A. Starkov, Yu.B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.

The results are presented of neutron-physical calculations of the SM reactor campaigns performed during the reactor operation in 2000-2010. With the account of fuel burnup in the fuel rods and arrangement of the control rods, the heat rate distribution has been defined as well as the maximal thermal flux density values. The mechanisms of heat rate distribution during the reactor refueling and campaigns were examined, the control rods being removed according to the set procedure. A methodical approach to the evaluation of the core hydroprofiling has been proposed.

УДК 621.039.51

Graph Representation for VVER-1000 Core Conditions \ R.R. Alyev, S.T. Leskin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 8 illustrations. – References, 4 titles.

A method is presented which makes it possible to control core conditions is based on in-core monitoring data handling (power density detectors (PDD) and thermocouples (TC)). To control core conditions the method also enables to use PDD and TC together and to represent output in well-behaved view. The method is used for analyzing in-core monitoring data at Kalinin NPP. Adequate mapping of core conditions has been verified.

УДК 621.039.58

Neural Network Models for signal filtering and PWR leakage Diagnostics \ A.O. Skomorokhov, A.A. Kudryev, S.A. Morozov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 2 tables. – References, 7 titles.

The article is devoted to the diagnosis of anomalous situations involving loss of coolant in the 1-st loop of PWR reactors. The results of studies carried out in implementing the system diagnosing leaks on KalNPP. Considered by multiple polynomial models for filtering acoustic signals in a system of reactor pipes leakage control, to reduce the likelihood of false alarms of the system. Proposed neural network algorithm for diagnosing the leakage.

УДК 629.039.58

LINQUAD Program Validation for Uncertainty Analysis of Transient Emergency Process Calculation Results on Nuclear Energy Installation with VVER-1000 Reactor \ M.A. Uvakin, I.G. Petkevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 7 titles.

This work deals with LINQUAD program application for uncertainty analysis of transient processes calculation by the example of international test problem with steam pipe rupture on reactor installation. Also, there is a comparing of LINQUAD method with GRS method which is widely used for similar