

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕЧИ

А.О. Скоморохов*, П.А. Белоусов*, С.А. Морозов**

** Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск*

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



В данной статье впервые рассматривается применение алгоритмов кластерного и факторного анализа, а также многомерного шкалирования для анализа сигналов системы акустического контроля течи (САКТ). Кратко рассматриваются основы работы САКТ и задачи, которые необходимо решить для улучшения работы алгоритма обработки данных. Проведенный анализ позволил выделить источники фоновых акустических шумов в реакторной установке ВВЭР-1000. Эти результаты позволят повысить достоверность принятия решений при эксплуатации системы.

ВВЕДЕНИЕ

Особое место среди возможных нарушений в работе АЭС занимают аварийные ситуации, связанные с потерей теплоносителя 1 контура.

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 3 блоке Калининской АЭС с реактором ВВЭР-1000 акустическая система контроля течей теплоносителя САКТ [1]. Результаты испытаний показали, что алгоритмы обработки сигналов, разработанные теоретически и проверенные на стендовых условиях, нуждаются в доработке. В реальных условиях, как при работе реактора на мощности, так и при переходных режимах, существует много внешних факторов, мешающих выявлению течи и обуславливающих ложные срабатывания системы.

По результатам испытаний за год работы системы САКТ накоплен значительный объем (десятки гигабайт) несистематизированных данных, которые подлежат углубленному анализу с использованием современных математических методов и компьютерных технологий. Задачами такого анализа являются сокращение размерности данных (выбор информативных признаков) и сокращение объема данных (сжатие, выбор частей данных, представляющих наибольший интерес), выявление в данных скрытых закономерностей, связей и особенностей, полезных для построения алгоритмов диагностирования. Эти задачи относятся к быстро развивающейся области «извлечения данных и знаний» (Data Mining and Knowledge Discovery) [2-3].

В настоящей работе рассмотрено решение задачи выявления связей сигналов системы акустического контроля течей с использованием методов кластерного и факторного анализа.

СИСТЕМА САКТ

Система САКТ включает в себя 53 акустических датчика, блоки сбора информации и коммутационные линии. На каждой из четырех петель 1-го контура РУ ВВЭР-1000 установлено по 8 контактных акустических датчиков волноводного типа (по 3 – на участках реактор – ГЦН и ГЦН-парогенератор; по 2 – 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; 6 датчиков – на трубопроводах СА03. Схема РУ и расположения датчиков представлена на рис. 1.

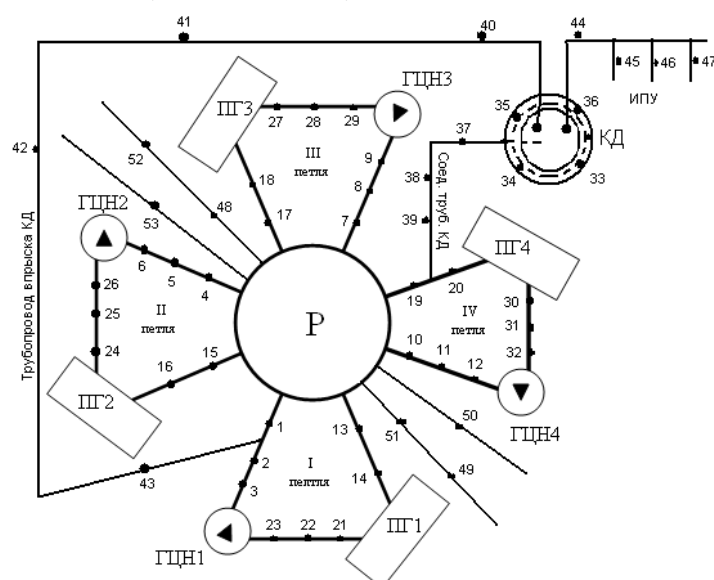


Рис. 1. Распределение акустических датчиков системы САКТ на трубопроводах ГЦК и вспомогательных систем 3 блока Калининской АЭС

В данной работе мы будем рассматривать только 32 датчика, установленные на 4 петлях главного циркуляционного контура. Для удобства последующей интерпретации мы перенумеруем датчики системы так, чтобы номер монотонно менялся от входа в реактор, через ГЦН на ПГ и от ПГ до выхода из реактора по каждой петле.

Нумерация датчиков

Петля I		Петля II		Петля III		Петля IV	
№	Датчик	№	Датчик	№	Датчик	№	Датчик
1	A1	9	A4	17	A7	25	A10
2	A2	10	A5	18	A8	26	A11
3	A3	11	A6	19	A9	27	A12
4	A23	12	A26	20	A29	28	A32
5	A22	13	A25	21	A28	29	A31
6	A21	14	A24	22	A27	30	A30
7	A14	15	A16	23	A18	31	A20
8	A13	16	A15	24	A17	32	A19

Применяемая нами нумерация приведена в табл. 1.

Мы будем ссылаться на участки трубопровода от реактора до парогенератора (через ГЦН) как на «холодные» участки, и на участки

Таблица 1

от парогенератора до реактора как на «горячие» участки трубопровода.

ОПИСАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Отрезок временного ряда по одному из датчиков системы САКТ с частотой оцифровки 1 Гц представлен на рис. 2.

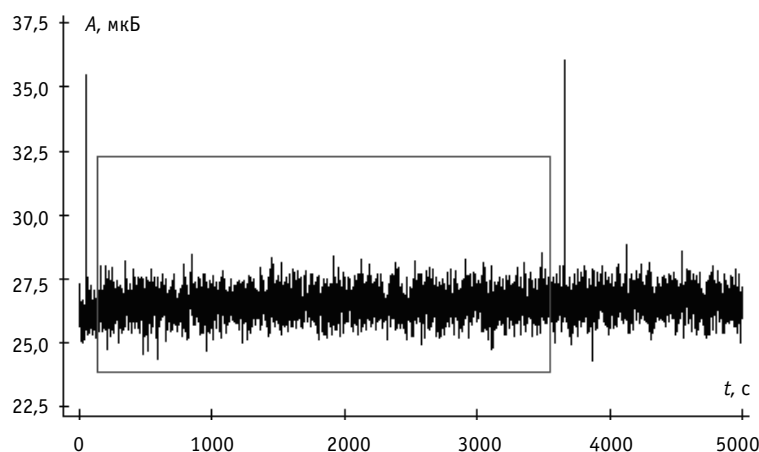


Рис. 2. Изменение интенсивности сигнала во времени между двумя тестовыми сигналами

Выбросы, превышающие уровень в 35 мкВ, соответствуют тестовым сигналам, подаваемым на датчики раз в час. Для анализа выбирался участок временного ряда длиной 3000 точек между тестовыми сигналами. Для всех рассматриваемых датчиков массив, используемый для анализа, представлял матрицу:

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix},$$

где n – число датчиков (32), m – число временных отсчетов (3000), а x_{ij} – показания j -го акустического датчика в i -й момент времени.

Всего было сформировано 36 матриц \hat{X} для различных периодов проведения измерений $\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_{36}$.

Основной анализ проводился по единственной матрице \hat{X}_1 , а затем повторялся для всех остальных выборок для проверки устойчивости и статистической значимости получаемых результатов.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Рассмотрим взаимную корреляционную функцию (ВКФ) сигналов датчиков I петли с номерами 1, 2 (рис. 3). Из рис. 3 видно, что, во-первых, сигналы имеют достаточно высокий коэффициент корреляции и, во-вторых, отсутствует запаздывание между сигналами.

Пример ВКФ для сигналов более удаленных датчиков одной петли (1 и 8) приведен на рис. 4.

Коэффициент корреляции уменьшился почти в 2 раза, что может быть объяснено демпфирующим влиянием парогенератора и главного циркуляционного насоса, разделяющих эти датчики. Запаздывания между сигналами не наблюдается.

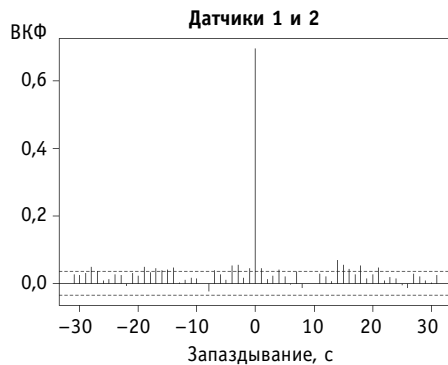


Рис. 3. Взаимная корреляционная функция сигналов соседних датчиков одной петли

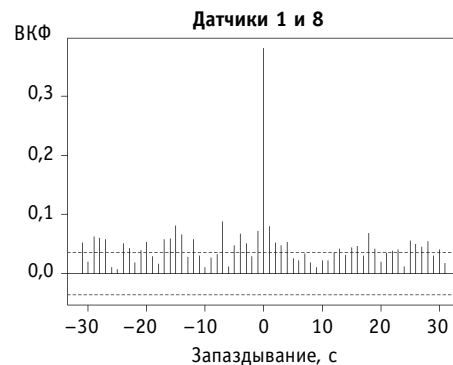


Рис. 4. Взаимная корреляционная функция сигналов удаленных датчиков одной петли

Сигналы близко расположенных датчиков одной петли (7 и 8) опять имеют высокую корреляцию, что проиллюстрировано на рис. 5.

Для сигналов одинаково расположенных датчиков разных петель (например, 1 и 9) корреляция несущественна, что видно из рис. 6.

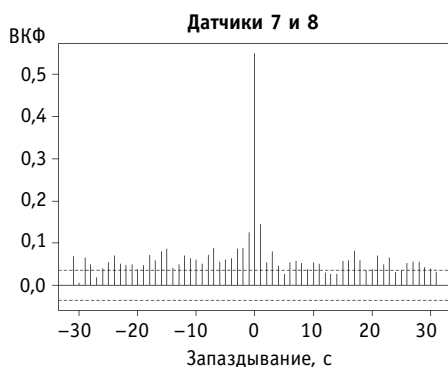


Рис. 5. Взаимная корреляционная функция сигналов соседних датчиков одной петли (горячий участок)

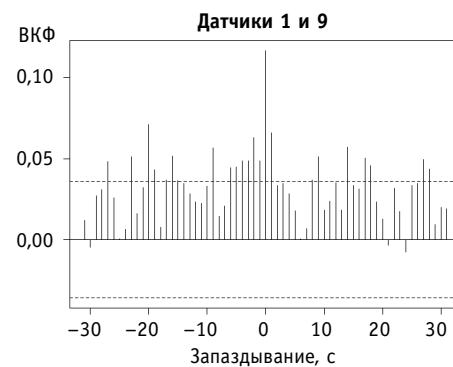


Рис. 6. Взаимная корреляционная функция сигналов датчиков с разных петель

Удивительным оказалось то, что высокую корреляцию имеют сигналы от одинаково расположенных датчиков горячих участков разных петель. Пример для датчиков 8 и 15 приведен на рис. 7.

Приведенные предварительные результаты наталкивают на гипотезу о сильной корреляции сигналов датчиков, расположенных на одной петле, на участке от ПГ, через ГЦН до входа в реактор (холодный участок). С другой стороны, сигналы датчиков, расположенных на участках от выхода из реактора до ПГ (горячие участки), имеют сильную корреляцию между собой (независимо от принадлежности к одной или разным петлям) и более слабую корреляцию с сигналами датчиков холодных участков.

Поскольку анализ ВКФ не выявил запаздываний между сигналами различных датчиков, мы можем перейти от рассмотрения ВКФ к рассмотрению корреляционных матриц.

Корреляционная матрица, вычисленная для всех датчиков первой петли представлена в табл. 3. Видно, что сигналы датчиков одного участка (горячего или холодного) сильно коррелируют между собой, а сигналы датчиков разных участков коррелируют слабее. Для большей наглядности в табл. 3 приведено сравнение корреляционной матрицы с порогом 0.5 (в таблице «1» означает коэффициент корреляции больший, чем 0.5). Из табл. 3 видно, что датчики 1–6 и 7–8 образуют 2 группы, имеющих

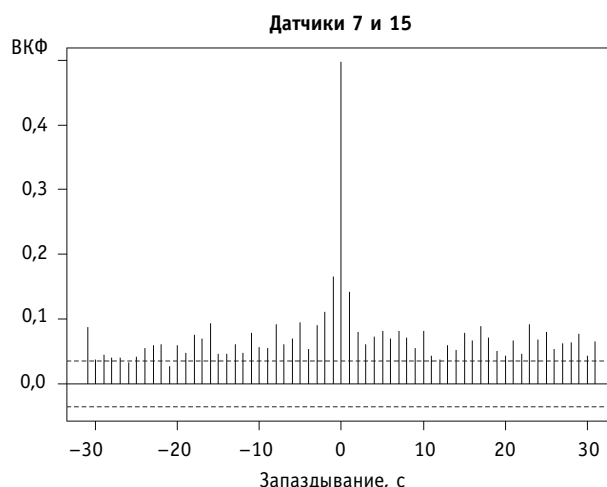


Рис.7. Взаимная корреляционная функция сигналов датчиков с горячих участков разных петель

сильную корреляцию для датчиков внутри группы и слабую корреляцию для датчиков, принадлежащих разным группам (участкам трубопровода).

Рассмотрим теперь корреляцию сигналов датчиков, расположенных на разных петлях. Пример корреляционной матрицы датчиков I и II петель приведен в табл. 4. Коэффициенты корреляции вычислялись для всевозможных пар датчиков I и II петель, т.е. ρ_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, 8$ представляет собой коэффициент корреляции между i -м датчиком петли I и j -м датчиком петли II. Корреляционная матрица в табл. 4 опять

Таблица 2
Корреляционная матрица, петля I

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.00	0.74	0.62	0.66	0.71	0.75	0.46	0.50
2	0.74	1.00	0.74	0.78	0.80	0.78	0.41	0.44
3	0.62	0.74	1.00	0.83	0.74	0.66	0.33	0.35
4	0.66	0.78	0.83	1.00	0.77	0.71	0.34	0.37
5	0.71	0.80	0.74	0.77	1.00	0.77	0.39	0.41
6	0.75	0.78	0.66	0.71	0.77	1.00	0.43	0.46
7	0.46	0.41	0.33	0.34	0.39	0.43	1.00	0.61
8	0.50	0.44	0.35	0.37	0.41	0.46	0.61	1.00

Таблица 3
Превышение порога

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

Таблица 4
Корреляционная матрица, петли I и II

	1	2	3	4	5	6	7	8
9	0.14	0.11	0.06	0.05	0.06	0.06	0.38	0.41
10	0.11	0.09	0.06	0.04	0.04	0.05	0.34	0.36
11	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.28	0.28
12	0.10	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.30	0.30
13	0.10	0.07	0.04	0.03	0.02	0.03	0.32	0.33
14	0.11	0.08	0.04	0.03	0.03	0.04	0.35	0.37
15	0.23	0.20	0.14	0.13	0.15	0.16	0.55	0.51
16	0.27	0.23	0.17	0.17	0.18	0.19	0.56	0.53

Таблица 5
Превышение порога

	1	2	3	4	5	6	7	8
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	1	1
16	0	0	0	0	0	0	1	1

подтверждает нашу гипотезу о слабой корреляции сигналов датчиков разных петель, за исключением датчиков, расположенных на горячих участках. Для наглядности в табл. 5 приведена матрица превышения порога 0.5 по коэффициенту корреляции. Группа единиц в нижнем правом углу таблицы указывает на высокие корреляции датчиков 7, 8 первой петли и датчиков 15, 16 второй петли.

Полученные результаты проверялись на устойчивость по всем 36 выборкам данных. В следующем разделе мы проведем кластерный анализ данных для более строгой проверки выявленных зависимостей шумов различных датчиков системы САКТ.

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Задачей кластерного анализа является выявление групп (кластеров, скоплений) точек многомерного пространства, близких между собой (похожих друг на друга) и отличающихся от точек, принадлежащих другим кластерам. Кластерный анализ временных рядов рассмотрен нами применительно к диагностике АЭС в статье [4].

В настоящей работе был применен алгоритм кластерного анализа, основанный на построении кратчайшего незамкнутого пути (КНП). КНП является графом наименьшей длины, соединяющим все точки выборки и не имеющим петель [5]. После построения полного графа его наиболее длинные ребра разрезаются. Полученные подграфы образуют кластеры, что проиллюстрировано на рис. 8.

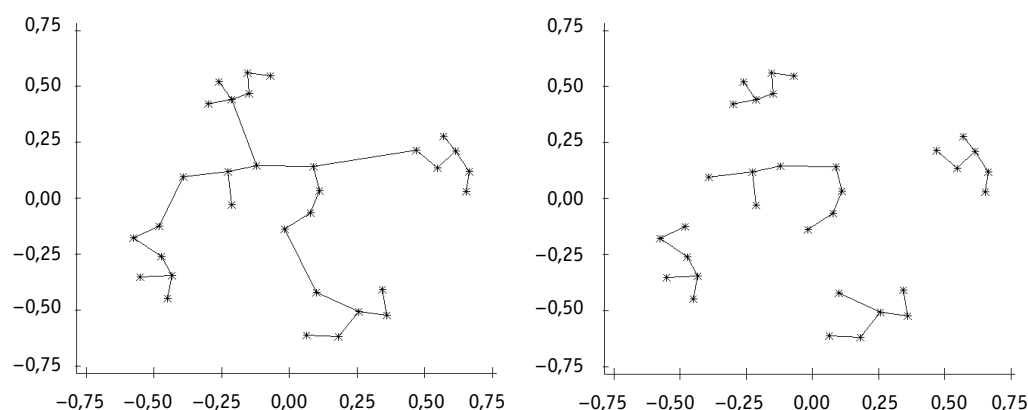


Рис. 8. Граф, построенный методом КНП и его расщепление

Алгоритм был реализован в виде программы на языке Dyalog APL [8] и применен к выборке данных по 32 датчикам объемом 3000 измерений. Результаты кластеризации представлены в табл. 6.

Видно, что 4 кластера соответствуют четырем петлям реактора (датчики, расположенные от ГЦН до входа в реактор), а кластер номер 2 включает датчики на горячих участках всех петель. Таким образом, можно говорить о пяти источниках акустических шумов – четырех индивидуальных для каждой петли и пятом, глобальном для всех датчиков, расположенных на выходе из реактора.

Таблица 6

Результаты кластеризации

Кластер	Номера датчиков	Номер петли
1	9 10 11 12 13 14	II
2	7 8 15 16 23 24 31 32	Все
3	25 26 27 28 29 30	IV
4	1 2 3 4 5 6	I
5	17 18 19 20 21 22	III

Для визуализации полученных результатов нами применялся нелинейный метод понижения размерности Сэммонса [6]. Если точки в исходном пространстве представлены множеством векторов:

$$\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N$$

и имеют парные расстояния:

$$d_{ij} = \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\| = \left[\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2 \right]^{1/2},$$

то точки на плоскости (результат проектирования) заданы множеством векторов:

$$\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_N$$

и должны иметь парные расстояния:

$$d_{ij}^* = \|\vec{y}_i - \vec{y}_j\| = \left[\sum_{k=1}^2 (y_{ik} - y_{jk})^2 \right]^{1/2},$$

максимально соответствующие расстояниям в исходном пространстве признаков. В качестве критерия соответствия принимается следующий критерий:

$$\epsilon = \left(\sum_{i < j}^N d_{ij} \right)^{-1} \sum_{i < j}^N (d_{ij} - d_{ij}^*)^2 / d_{ij},$$

который минимизируется градиентным методом.

Результат применения метода Сэммона в системе статистических вычислений R[7] представлен на рис. 9.

Видно, что кластер, соответствующий горячим участкам, расположен в центре, а 4 кластера, соответствующие петлям реактора, окружают его.

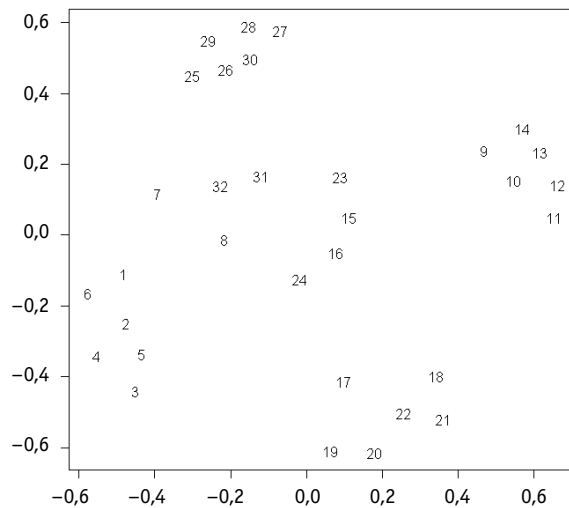


Рис. 9. Проекция исходных сигналов на плоскость Сэммона

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Основным предположением факторного анализа является предположение о том, что взаимные корреляции наблюдаемых переменных x_1, x_2, \dots, x_n могут быть объяснены влиянием меньшего числа скрытых (ненаблюдаемых) переменных или факторов $f_1, f_2, \dots, f_k, k < n$ [9]. Модель факторного анализа обычно представляют в виде системы уравнений:

$$x_1 = \lambda_{11}f_1 + \lambda_{12}f_2 + \dots + \lambda_{1k}f_k + u_1$$

$$x_2 = \lambda_{21}f_1 + \lambda_{22}f_2 + \dots + \lambda_{2k}f_k + u_2$$

$$\vdots$$

$$x_n = \lambda_{n1}f_1 + \lambda_{n2}f_2 + \dots + \lambda_{nk}f_k + u_n.$$

Каждая наблюдаемая переменная представляется как взвешенная сумма скрытых факторов плюс специфические для этой переменной остатки u . Весовые коэффициенты λ называются факторными нагрузками и являются определяющими при интерпретации полученных факторов.

Задачи факторного анализа: определение числа факторов, факторных нагрузок и

специфических остатков. После нахождения факторов для улучшения их интерпретируемости часто производят вращение системы координат.

Факторный анализ акустических сигналов системы САКТ проводился в среде статистических вычислений R [7], и число факторов было принято равным 5. Другими словами, мы предполагали, что взаимные корреляции всех 32 рассматриваемых датчиков могут быть объяснены влиянием пяти скрытых факторов.

Полученные в результате факторные нагрузки приведены в табл. 7. В таблице занулены малые факторные нагрузки ($\lambda < 0.4$). Таблица состоит из двух частей: в верхней части представлены нагрузки на 5 факторов датчиков 1–16, в нижней – датчиков 17–32.

Таблица 7

Факторные нагрузки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
F1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85	0.89	0.86	0.9	0.92	0.88	0	0
F3	0.71	0.86	0.82	0.87	0.86	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F4	0	0	0	0	0	0	0.63	0.66	0	0	0	0	0	0	0.62	0.58
F5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
№	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
F1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85	0.88	0.87	0.9	0.89	0.87	0	0
F2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F4	0	0	0	0	0	0	0.55	0.55	0	0	0	0	0	0	0.61	0.6
F5	0.69	0.8	0.79	0.8	0.79	0.73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Из табл. 7 видно, что, например, все датчики 1–6 имеют ненулевую факторную нагрузку только на фактор F3, т.е. поведение и взаимные корреляции этих датчиков холодного участка петли I определяются влиянием только одного скрытого фактора. В то же время фактор F3 имеет ненулевые факторные нагрузки только для датчиков 1–6, т.е. не влияет на другие датчики. Это упрощает интерпретацию скрытого фактора F3 как общего источника шумов для датчиков холодного участка первой петли.

Аналогично, фактор F2 определяет шумы холодного участка второй петли (датчики 9–14), фактор F5 определяет поведение датчиков 17–24 (петля III) и фактор F1 влияет на датчики 25–30 (петля IV). Наконец, фактор F4 имеет ненулевые нагрузки только для датчиков 7, 8, 15, 16, 23, 24, 31, 32, т.е. для датчиков на горячих участках всех 4 петель. Этот фактор определяет общий источник шумов, действующий на выходе из реактора и демпфируемый парогенераторами при дальнейшем течении теплоносителя.

Таким образом, проведение факторного анализа окончательно подтвердило нашу гипотезу, высказанную по результатам предварительного анализа корреляций и подтвержденную результатами кластерного анализа.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в настоящей работе статистические закономерности и взаимосвязи показаний акустических датчиков системы САКТ представляют самостоятельную ценность, т.к. позволяют устранить влияние технологических источников шумов и повысить надежность выявления сигналов собственно течи теплоносителя. Хотя физическая и технологическая интерпретация выявленных эффектов представляет несомненный интерес, она выходит за рамки данной статьи. Здесь мы представим только краткую информацию по возможной интерпретации полученных результатов. Более под-

робно физические и технологические источники акустических шумов в реакторной установке ВВЭР-1000 рассмотрены в работе [1].

Источниками «индивидуальных» шумов в сигналах датчиков холодных участков каждой петли могут быть системы продувки – подпитки теплоносителя первого контура. Основными функциями этой системы, как известно, являются сбор протечек теплоносителя из первого контура, проведение технологических операций очистки его от различных примесей, в том числе и от распределенных в нем газовых включений и, наконец, возврат теплоносителя в первый контур. Трубопроводы этих системы «врезаны» в эти главные циркуляционные трубопроводы в районе холодных участков каждой петли.

На рис. 10 представлены схематические диаграммы показаний каждого из 32 датчиков на трубопроводах ГЦК. Верхние и нижние грани вертикальных прямоугольников соответствуют квантилям (квантилям уровней 0.75 и 0.25). Горизонтальная черта внутри прямоугольника показывает значения медианы сигнала, а вертикальные линии проведены до максимального и минимального значения сигнала. Датчики распределены по оси абсцисс через равные интервалы (без соблюдения реального расстояния между ними) таким образом, чтобы соблюдалась последовательность их расстановки в каждой петле – от датчика на входе в реактор до датчика на выходе из него (см. рис. 1).

Наличие максимумов в распределениях интенсивности шумов по холодным трубопроводам петель («холодные» трубопроводы между ГЦН и входными патрубками корпуса ядерного реактора) соответствуют местам «врезки» систем продувки – подпитки.

Очистка теплоносителя от газовых включений осуществляется в системе с помощью деаэратора. По-видимому, деаэрация теплоносителя в деаэраторе является интенсивным шумообразующим процессом с широким частотным спектром.

Общим источником шумов для датчиков, установленных на горячих участках петель являются флуктуации газосодержания в теплоносителе, связанные с флуктуациями давления и температуры теплоносителя. Эта гипотеза может быть подтверждена после организации более высокочастотного измерения технологических параметров реакторной установки.

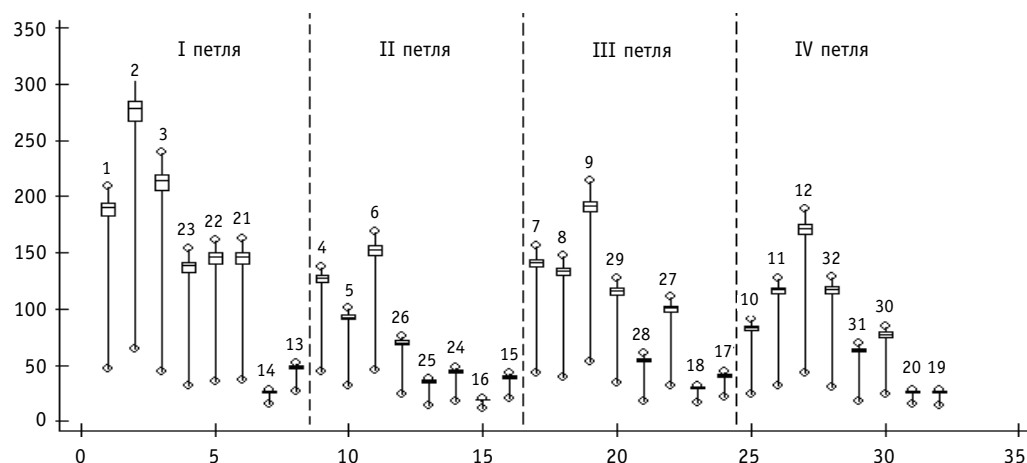


Рис. 10. Статистические характеристики сигналов датчиков в энергетическом режиме

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение алгоритмов кластерного анализа, многомерного шкалирования и факторного анализа позволило независимыми методами выделить зависимости показаний датчиков и источники фоновых акустических шумов в реакторной установке ВВЭР-1000. Полученные результаты могут повысить достоверность принятия решений при эксплуатации системы обнаружения течей и демонстрируют эффективность примененных математических методов для анализа данных в задачах технической диагностики АЭС.

Литература

1. Морозов С.А. и др. Исследование источников фоновых акустических шумов главного циркуляционного контура РУ с ВВЭР-1000/Препринт ФЭИ-3083, 2006 г.
2. Larose D.T. *Discovering Knowledge in Data*. – John Wiley&Sons, 2005.
3. Han J. and Kamber M. *Data Mining: Concepts and Techniques*. – New York: Morgan Kaufman Publishers, 2001.
4. Белоусов П.А., Скоморохов О. Разработка и применение методов обнаружения изменения свойств и прогнозирования временных рядов в задачах диагностирования АЭС//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 3. – С. 3-1.
5. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. – М.: Советское радио, 1972.
6. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. – М.: Наука, 1979.
7. R Project. <http://www.r-project.org>
8. Dyalog APL/W. Version 10.1. <http://www.dyalog.com>
9. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ (пер.с англ.). – М.: МИР, 1967.

Поступила в редакцию 20.10.2006