

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАСОСОВ ВЫСОКОГО И НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС С ВВЭР

**С.Т. Лескин, В.В. Валуй**

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



Обсуждаются вопросы применения метода главных компонент для диагностики состояния насосов высокого и низкого давления АЭС с ВВЭР. На основании выбранной статистической модели с использованием энтропии получен комплекс информативных признаков, описывающий динамику поведения насосов. Представлены результаты обработки данных четвертого блока Балаковской АЭС. Выделены аномалии в состоянии насосов и параметры, обусловившие их возникновение.

## ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой ядерных установок является обеспечение надежности элементов технологических систем, входящих в их состав. В настоящее время важной задачей эксплуатации оборудования в энергосистемах является поддержание его работоспособности экономически оптимальными мерами. Расчеты показывают, что оптимальное проведение профилактических мероприятий в соответствии с текущим состоянием объектов снижает до пяти раз расходы на ремонты и ущербы от перерывов энергоснабжения [1]. Отказы насосного оборудования на АЭС с ВВЭР составляют около 6% от общего числа нарушений [2], и эта цифра практически не уменьшается.

На АЭС с ВВЭР особые затруднения вызывает диагностика насосов системы аварийного ввода бора (САВБ) высокого и низкого давления. Контроль состояния насосов САВБ на станции проводится посредством периодических испытаний, в ходе которых производится замер ряда технологических параметров. Вывод о необходимости ремонта делается по принадлежности полученных данных установленному регламентом диапазону значений.

Однако, как показывает опыт эксплуатации, несмотря на проводимую в результате испытаний диагностику выход насосов из строя зачастую является непредсказуемым. Причиной этого может быть как несовершенство процедуры сбора данных, так и неверная их интерпретация, влекущая за собой ошибочную диагностику. Даже если испытания прошли успешно, у эксплуатационного персонала нет достаточной уверенности, что при необходимости включения или при следующих испытаниях не произойдет отказ.

© С.Т. Лескин, В.В. Валуй, 2002

Еще одна проблема диагностирования состояния насосов высокого и низкого давления заключается в том, что выход их из строя происходит именно вследствие испытаний. С одной стороны, надо чаще проводить испытания, чтобы своевременно обнаружить отклонение в состоянии насоса, с другой стороны, каждый его запуск приводит к уменьшению ресурса агрегата.

Таким образом, одной из задач обеспечения надежной работы АЭС с ВВЭР является создание сравнительно недорогой системы диагностики насосов САВБ, которая могла бы своевременно по результатам испытаний обнаружить аномальные процессы в элементах их оборудования до развития нарушений, связанных с отключениями насосов.

Для решения задачи диагностирования насосов САВБ, в условиях которой приходится иметь дело с множеством данных различной физической природы, определяющих состояние объекта, наиболее эффективно использование статистической модели представления исходных данных [3]. Разложение Карунена-Лоева позволяет наглядно выявить аномалию, устойчиво проявляющуюся в некотором наборе измеряемых параметров, которые отображаются в двумерное пространство главных компонент. Поскольку матрица данных испытаний имеет большую размерность, для отображения в двумерное пространство проводится отсеивание малоинформативных параметров посредством вычисления энтропии для различных временных сечений. Данная процедура позволяет из всего объема измеряемых параметров выбрать комплекс информативных признаков, тем самым уменьшая размерность и повышая информативность входной матрицы данных.

Как показала практика, до самого процесса аварийного отключения насоса его параметры находятся в эксплуатационных пределах, и в рамках традиционного подхода (контроля за отклонениями параметров) нет оснований считать его аномальным. Напротив, результаты обработки данных позволяют сделать вывод, что аномалия в состоянии насосов САВБ проявляется задолго до обнаружения нарушения штатными системами контроля.

В статье описываются возможности метода главных компонент. Приводятся результаты обработки реальных данных Балаковской АЭС.

## ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

В задаче исследования динамики поведения насосов данные испытаний образуют трехмерное пространство, измерениями которого являются дата испытания, временное сечение, отсчитываемое от момента пуска насоса, и номер измеряемого параметра. Таким образом, анализ поведения насосов от испытания к испытанию представляет собой довольно трудоемкий процесс, для оптимизации которого необходимо произвести сокращение матрицы исходных данных.

На первом этапе осуществляется переход от трехмерного к двумерному пространству посредством формирования матрицы информативных признаков. Поскольку кривые зависимостей поведения любого измеряемого технологического параметра практически идентичны от испытания к испытанию, за исключением некоторых участков, в качестве информативных признаков целесообразно взять значения параметров в тех сечениях графиков, которые наиболее отличаются друг от друга и, следовательно, отображают основную информацию о динамике поведения насосов.

В качестве меры, характеризующей вероятностный разброс данных, принимается энтропия [4] - сумма произведений вероятностей различных состояний какого-либо параметра  $X$  на логарифмы этих вероятностей, взятая с обратным знаком:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – вероятность  $i$ -ого состояния;  $N$  – число состояний системы.

Для выбора наиболее информативного сечения кривой воспользуемся тем свойством, что энтропия обращается в максимум, когда все состояния системы равновероятны. Будем рассматривать значения какого-либо параметра на фиксированном участке кривой в разных испытаниях как возможные состояния системы. В таком случае, чем меньше энтропия временного сечения кривой, тем в большем числе испытаний значения параметра на этом участке принимают близкие, похожие значения, т.е. имеют тенденцию повторяться от испытания к испытанию. Следовательно, основную информацию несут в себе временные сечения, обладающие максимальной энтропией.

Для каждого измеряемого параметра выделяется определенное количество информативных сечений, которые в совокупности представляют набор информативных признаков, описывающих поведение насоса в течение отдельного испытания. Таким образом, формирование матрицы информативных признаков позволяет, с одной стороны, перейти к двумерному пространству, что облегчает процесс анализа динамики поведения насосов, и, с другой стороны, отсеять малоинформативный «шум», что повышает точность анализа.

## **ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ В ПРОСТРАНСТВО ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ**

Поскольку полученная на первом этапе матрица информативных признаков еще не позволяет наглядно отобразить структуру данных, для их дальнейшего анализа с целью выявления особенностей поведения насосов необходимо перейти от большего числа исходных информативных признаков к существенно меньшему числу наиболее эффективных, являющихся функциями от исходных признаков. Имеются, по крайней мере, три предпосылки, позволяющие сократить размерность данных: во-первых, дублирование информации при наличии сильно взаимосвязанных признаков, во-вторых, наличие признаков, мало меняющихся от одного измерения к другому, в-третьих, возможность представления некоторых признаков без существенной потери информации в виде линейных функций от других признаков.

Для представления матрицы информативных признаков в наглядном виде применяется разложение Карунена-Лоева [5, 6], которое позволяет осуществить переход от полученного двумерного пространства к более эффективному пространству главных компонент следующим образом. Пусть  $X$  – матрица размера  $n \times m$ , где  $n$  – число информативных признаков,  $m$  – количество испытаний, тогда ее можно представить разложением

$$X = \Phi Y, \quad (2)$$

где  $\Phi = [\Phi_1 \dots \Phi_n]$ ;  $Y = [Y_1 \dots Y_m]^T$ .

Матрица  $\Phi$  состоит из  $n$  линейно независимых векторов-столбцов (базисных векторов). При выполнении для нее условия ортонормированности компоненты матрицы  $Y$  определяются следующим образом:

$$Y = \Phi^T X. \quad (3)$$

Следовательно,  $Y$  представляет собой ортогональное преобразование исходной матрицы  $X$ . При этом компоненты каждого столбца матрицы  $Y$  являются признаками, которые вносят вклад в представление соответствующего столбца матрицы  $X$ .

Оптимальный выбор матрицы  $\Phi$  удовлетворяет условию

$$S \Phi_i = \lambda_i \Phi_i, \quad i = (1, \dots, n), \quad (4)$$

где  $S$  – корреляционная матрица исходной матрицы  $X$ , т.е. оптимальные базисные векторы разложения – это собственные векторы корреляционной матрицы  $S$ , соот-

ветствующие собственным значениям  $\lambda$ . Такое разложение минимизирует ошибку представления данных и в то же время максимально учитывает закономерности их распределения.

Уравнение (4) можно записать в следующей форме:

$$(S - \lambda E)\Phi = 0, \quad (5)$$

где  $E$  – единичная матрица. При симметричности корреляционной матрицы имеется  $n$  вещественных неотрицательных корней системы уравнений (5).

В данной задаче векторы  $Y_i$  рассматриваются как признаки, представляющие компоненты матрицы  $X$ . Эффективность каждого признака определяется величиной соответствующего собственного значения. Если некоторый признак  $Y_i$  исключается из разложения, то среднеквадратичная ошибка преобразования вектора  $X$  в пространство, базисом которого является вектор  $\Phi_i$ , увеличивается на  $\lambda_i$ . Поэтому для уменьшения количества признаков нужно, в первую очередь, исключить признак с наименьшим собственным значением и т.д. Если собственные числа пронумерованы в порядке убывания

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n > 0, \quad (6)$$

то признаки должны быть упорядочены по важности таким же образом.

Размерность признакового пространства уменьшается за счет того, что для разложения используются только первые две главные компоненты собственных векторов, соответствующие наибольшим собственным числам и несущие в себе более 90% информации. Поскольку эти компоненты вычисляются для каждого информативного параметра исходной матрицы, они служат своеобразными весами, определяющими отображение того или иного параметра в признаковое пространство. Следовательно, если при анализе отображения информативных параметров в признаковое двумерное пространство обнаружатся особенности в состоянии какого-либо насоса (точки, описывающие его поведение, будут расположены отдельно от общей группы), посредством сопоставления отображения информативных параметров в пространство главных компонент с весами параметров в этих же компонентах можно выявить причины аномалии.

Отдельный интерес представляет временная зависимость дисперсии [7] первой главной компоненты. Фактически дисперсию можно интерпретировать как меру отклонения состояния насоса от общего режима, имевшего место для насосов одной системы на какой-либо момент времени. Поскольку первая главная компонента несет в себе определяющее количество информации (порядка 80%), анализ данной зависимости позволяет выявить, когда и как именно происходило зарождение и развитие аномалии в состоянии какого-либо насоса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для преобразования в пространство главных компонент использовались данные Балаковской АЭС по насосам высокого давления (TQ13D01, TQ23D01, TQ33D01) и низкого давления (TQ14D01, TQ24D01, TQ34D01). В число измеряемых в процессе испытаний данных, описывающих поведение насосов, входили параметры, отображенные в табл. 1.

Графики зависимостей энтропий от временных сечений приведены на рис. 1 и 2. Матрицы информативных признаков соответственно для насосов высокого и низкого давления формировались из значений параметров, соответствующих сечениям с максимальной энтропией (на рисунках помечены маркером). Посредством вариантов расчетов установлено, что в информативную матрицу для насосов высокого давления целесообразно включать по три признака для каждого измеряемого параметра

Таблица 1

Обозначение параметра	Наименование параметра
P01	Давление во всасывающем трубопроводе насоса
P02	Давление в напорном трубопроводе насоса
F01	Расход насоса
T04	Температура 1 подшипника
T05	Температура 2 подшипника
T06	Температура 4 подшипника
T07	Температура 3 подшипника
T08	Температура за гидропятай

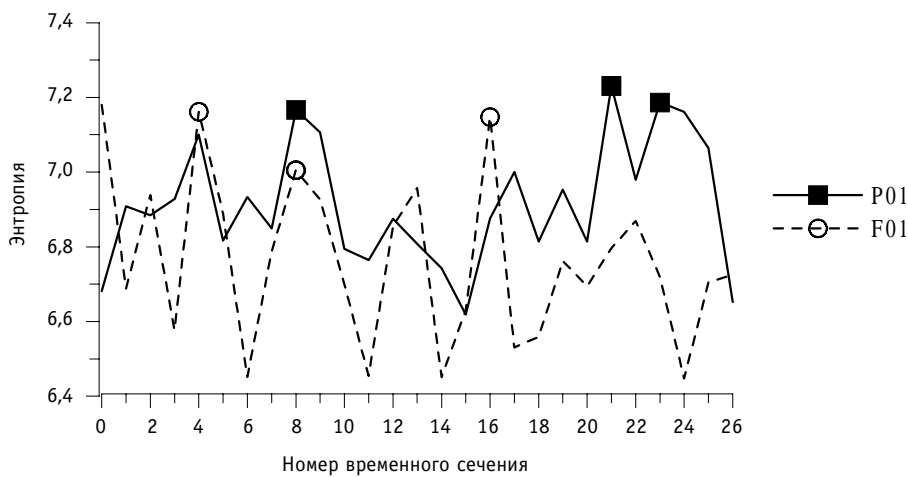


Рис. 1. Зависимость энтропии от временного сечения для насосов высокого давления

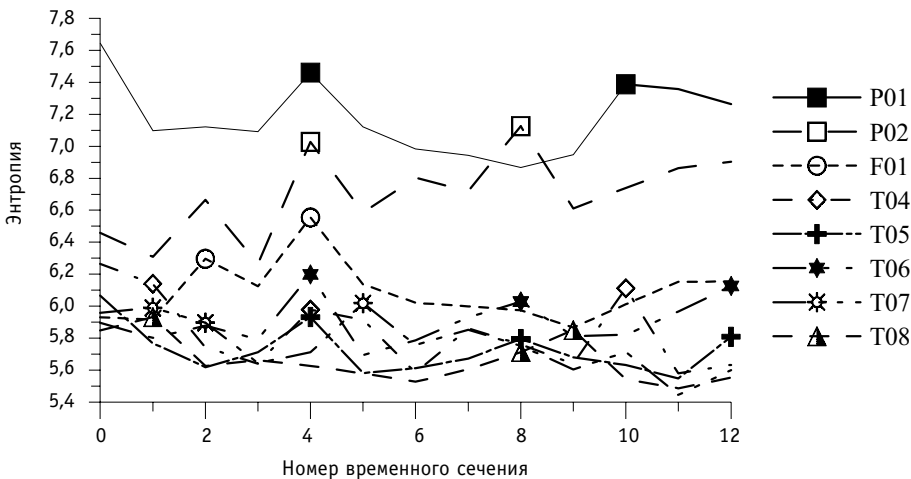


Рис. 2. Зависимость энтропии от временного сечения для насосов низкого давления

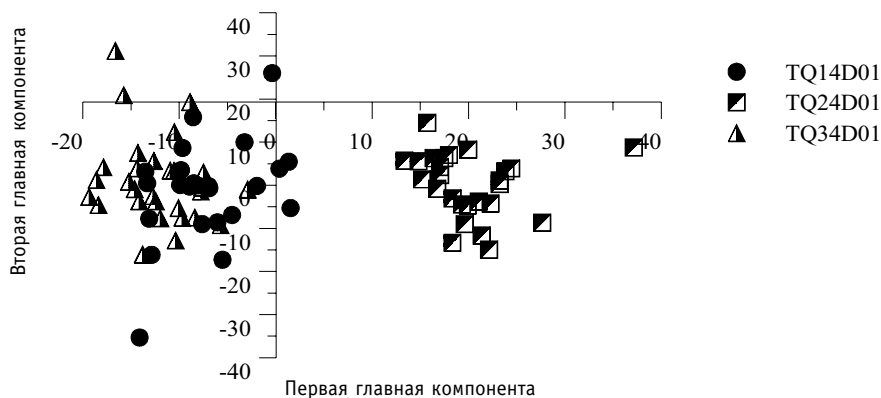


Рис. 3. Отображение матрицы информативных признаков в пространство главных компонент для насосов высокого давления

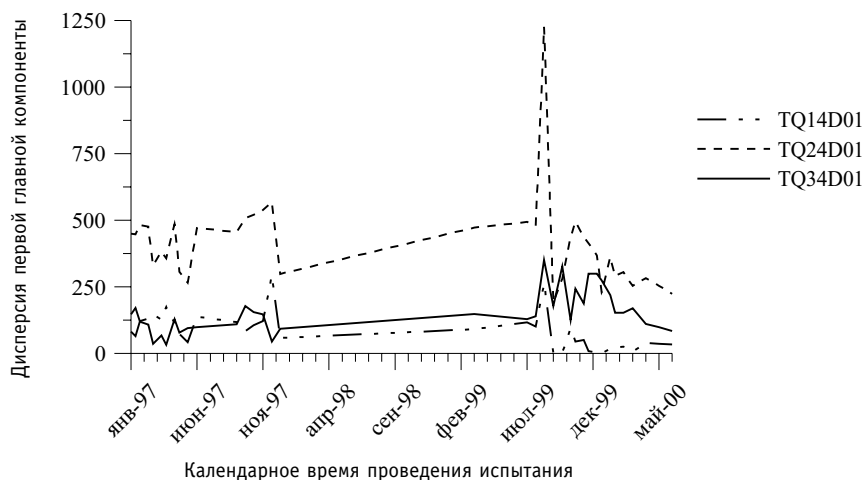


Рис. 4. Дисперсия первой главной компоненты для насосов высокого давления

ра, а для насосов низкого давления - по два информативных признака для давлений и расхода и по три признака для температур.

Результаты обработки данных испытаний насосов высокого давления представлены на рис. 3 и 4. Как видно из рис. 3, точки, описывающие поведение насосов TQ14D01 и TQ34D01, довольно плотно налагаются друг на друга, образуя единый класс, т.е. состояния этих насосов не различаются. Точки, определяющие состояние насоса TQ24D01, расположены далеко в стороне от основной группы, что можно интерпретировать как отличие в поведении этого насоса от общего режима. При анализе рис. 4 можно заметить, что аномалия на насосе TQ24D01 носит длительный временной характер, ее пик приходится на лето 1999 г., после чего она постепенно уменьшается.

По результатам сопоставления рис. 3 и 5 можно предположить, что к информативным параметрам, определяющим особенность состояния насоса TQ24D01, относится динамика расхода воды. К сожалению, это предположение относительно, поскольку в данном случае приходится ограничиваться тем небольшим количеством параметров, которые измеряются в ходе испытаний.

Результаты обработки данных насосов низкого давления представлены на рис. 6 и 7. Анализ поведения насосов низкого давления показывает, что области проекций данных по каждому насосу равномерно «размыты» вокруг начала координат, пересекаются между собой, и нет какой-либо закономерности в расположении точек. В

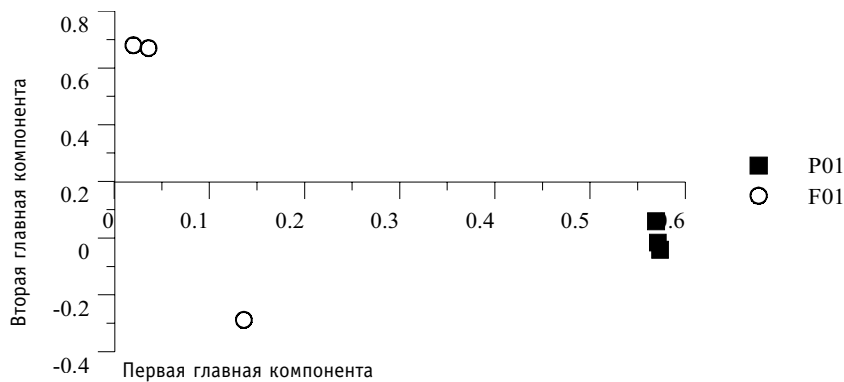


Рис. 5. Веса параметров в главных компонентах для насосов высокого давления

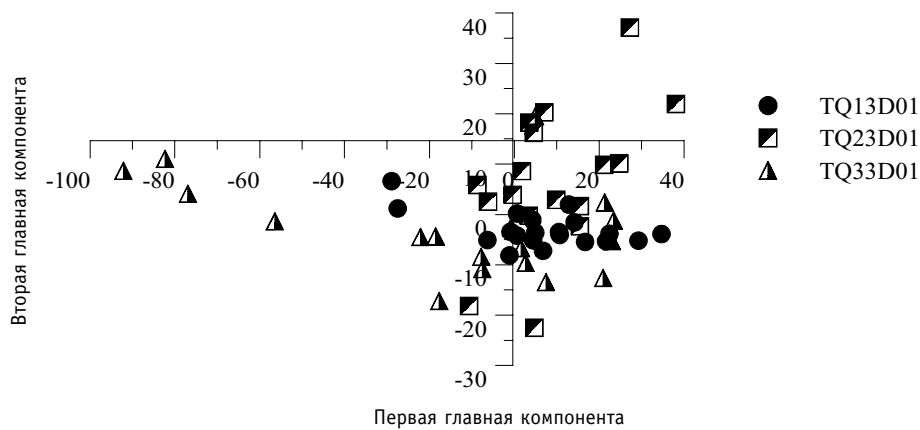


Рис. 6. Отображение матрицы информативных признаков в пространство главных компонент для насосов низкого давления

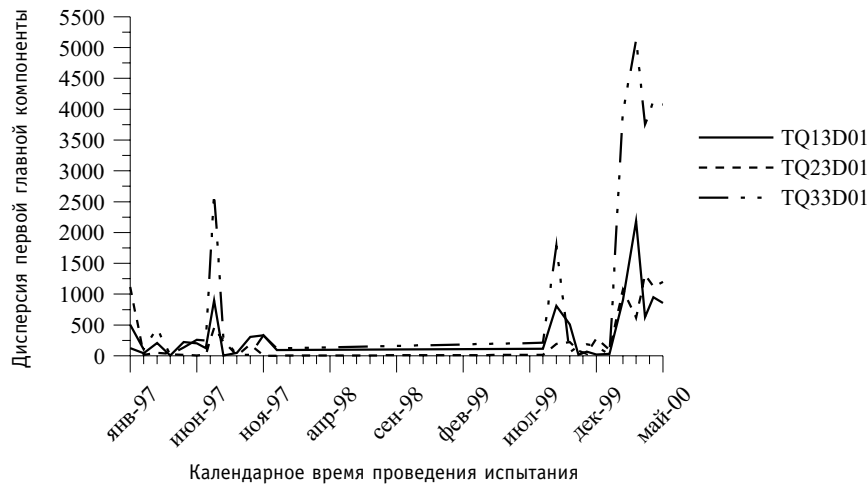


Рис. 7. Дисперсия первой главной компоненты для насосов низкого давления

целом состояние всех насосов можно считать удовлетворительным. Исключение составляют отдельные точки, характеризующие поведение насоса TQ33D01, отстоящие далеко в стороне от общей группы. Из рис. 7 видно, что аномалия на этом насосе проявляется не постоянно, а периодически, причем со временем период ее проявления имеет тенденцию уменьшаться. Следовательно, можно предположить наличие в

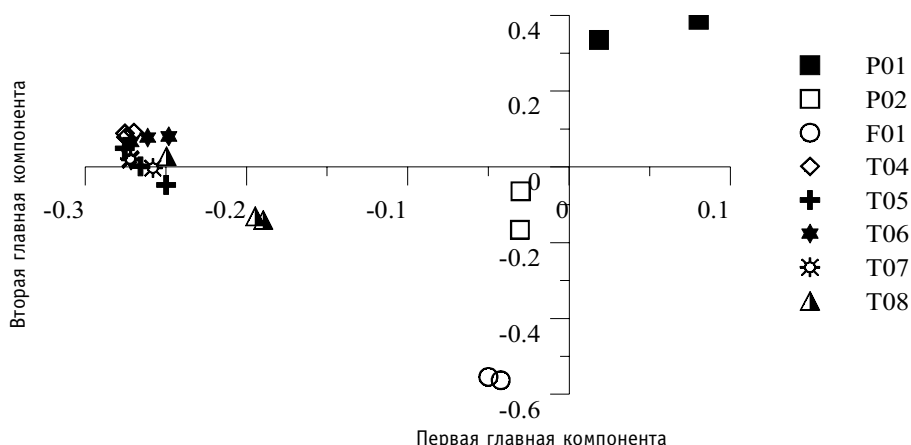


Рис. 8. Веса параметров в главных компонентах для насосов низкого давления

поведении насоса TQ33D01 отклонений от общего режима, которые в случае отсутствия своевременного вмешательства могут привести к отказу насоса.

По сопоставлению с графиком весов параметров (рис. 8) можно предположить, что определяющими параметрами в случае выявленных отклонений явились температуры подшипников.

## ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм диагностики состояния насосов САВБ, который позволяет распознавать аномалию в поведении насосов высокого и низкого давления на ранней стадии развития, что дает возможность своевременно принять меры для устранения причин нестабильной работы насоса и предотвратить аварию.

В основе алгоритма лежит разложение Карунена-Лоева. Из общего комплекса измеряемых параметров выделяются наиболее информативные. Матрица информативных признаков преобразуется в визуально наглядное пространство главных компонент.

Алгоритм опробован на данных Балаковской АЭС. Выделены длительная аномалия на насосе высокого давления второго канала и периодические отклонения в работе насоса низкого давления третьего канала. Установлено, что в первом случае аномалию определила динамика расхода воды, во втором случае – температуры подшипников.

## Литература

1. Копьев Ю.В. Экспресс анализ-работы АЭС России за первое полугодие 2000 г. Концерн «Росэнергоатом».
2. Антонов Б.В. Итоги эксплуатации АЭС России в 1995 г. // Ядерная энергетика. - 1996. - №3. - С.4-10.
3. Лескин С.Т., Зарюгин Д.Г. Разработка алгоритмов распознавания состояния оборудования АЭС по анализу данных оперативного технологического контроля // Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России. - М.: Изд. МЭИ, 1999.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: - М.: Высшая школа, 1999.
5. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. - Советское радио, 1972.
6. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. - М: Наука, 1979.
7. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. - М: Финансы и статистика, 1989.

Поступила в редакцию 1.10.2002



**УДК 621.039.51**

*Determination of Absolute Intensity of Extensive Sources by A Coincidence Method* \ V.V. Doulin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 6 pages, 3 illustrations, 1 table. - References, 5 titles.

Determination of absolute intensity of a point source by a coincidence method is used for a long time. Sometimes there is a need to determine the absolute intensity of an extensive source. Measurements and analysis results on its determination are presented in this work. A need of spatial Diven factor accounting for obtaining of a more accurate value of absolute intensity is demonstrated. A calculation of neutron flux  $\varphi(x)$  distribution from the source and adjoint flux  $\varphi^*(x)$  (importance) in relation to detector counts for the Diven factor obtaining has to be done.

**УДК 621.039.58**

*Application of Main Components Method for High and Low Pressure Pumps Diagnostic Based on Testing Data Analysis* \ S.T. Leskin, V.V. Valui; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 8 pages, 8 illustrations, 1 table. - References, 7 titles.

The application of main components method for diagnostic of the VVER high and low pressure pumps is discussed. On the basis of selected statistical model with use of entropy the complex of informative attributes describing dynamics of pumps behavior is received. The results of data processing of the forth block of the Balakovo NPP are presented. Pumps statement anomalies and caused their occurrence parameters are allocated.

**УДК 621.039.526:621.039.546.8**

*Verification of Hydraulic Characteristics of Experimental Facility "Circulating Loop"* \ E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.I. Belozarov, V.V. Maksimovskiy, A.Ia. Ustujanin, S.P. Pashkov, A.V. Shuvalov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 8 pages, 7 illustrations, 4 tables. - References, 8 titles.

Description of the experimental facility "Circulating Loop" of the thermal physics department is given. The developed system of dynamic control of thermal hydraulic modes necessary during experimental works is described. The results of an experimental research of some characteristics of the stand, in comparison with the experimental data of other authors and standard calculating dependences are given.

**УДК 621.039.534**

*Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium Flow Models. Generalization for Simple-Form Channel Flows* \ Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 12 pages, 7 illustrations, 2 tables. - References, 17 titles.

The article is devoted to construction of the generalized hierarchically closed analytical relationships (using drift flux model of two-phase non-equilibrium flow) for distribution parameters  $C_{ks}$  in quasi-one-dimensional form of the continuity, energy and momentum equations. A main assumption is power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and their assessment. The complementarity and mirror symmetry properties are revealed for parameter distributions, which are useful for verification purposes of the closure relationships for  $C_{ks}$ .

**УДК 621.039.534**

*Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium Flow Models. Generalization For Non-Monotone Parameter Profiles* \ Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineer-