

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ГЦН ВВЭР-1000 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.Т. Лескин, В.И. Слободчук, А.С. Шелегов

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249030, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*



Представлены метод и алгоритм определения аномального состояния главных циркуляционных насосов (ГЦН) энергоблока с реакторами ВВЭР-1000 по результатам их технологического контроля. Методологической основой алгоритма является представление оборудования атомной станции в виде сложной системы, описываемой N -мерным вектором в пространстве ее состояний. Большое количество технологических параметров, описывающих состояние оборудования, с помощью преобразования Карунена-Лоева сводится к значительно меньшему количеству информативных признаков и представляется в удобном для анализа виде. Эффективность метода продемонстрирована на определении аномального поведения ГЦН энергоблоков Калининской и Нововоронежской АЭС. Разработанный метод и алгоритмы анализа состояния ГЦН ВВЭР-1000 позволяют определить аномалию в состоянии насосов по данным эксплуатации задолго до обнаружения нарушений нормальной эксплуатации штатными системами контроля.

Ключевые слова: эксплуатация и диагностика главных циркуляционных насосов, аномальное состояние ГЦН, информативные признаки, преобразование Карунена-Лоева.

ВВЕДЕНИЕ

Из анализа аварий на АЭС и действий оперативного персонала в нестандартных ситуациях следует, что если оперативному персоналу своевременно предоставлять информацию об аномальном состоянии оборудования, то последствий многих аварий можно было бы избежать [1]. Создание систем диагностики развивается в нескольких направлениях. К настоящему времени различными авторскими коллективами разработан широкий спектр методов и алгоритмов диагностирования оборудования [2 – 6]. Опыт внедрения и эксплуатации диагностических систем показал [7 – 12], что надежность представляемой диагностической информации сомнительна, что вызывает скептическое отношение персонала к выдаваемым системой диагнозам. Наиболее перспективным направлением разработок являются алгоритмы на основе методов распознавания образов и кластерного анализа [13 – 17]. Ключевая проблема методов – необходимость иметь достоверную априорную информацию о наличии или отсутствии аномалии в состоянии оборудования. Каждый тип аномалии должен быть локализован в пространстве признаков, но такая информация зачастую отсутствует.

В работе представлены алгоритмы обнаружения аномалий в состоянии ГЦН по данным оперативного технологического контроля, основу анализа данных составляют кластерный анализ, распознавание образов, статистическая обработка измерений. При определении нормы и аномалии в состоянии ГЦН используются особенности проектирования и эксплуатации оборудования АЭС. Анализируются состояния насосов Калининской и Нововоронежской АЭС. Полученные результаты обработки данных эксплуа-

© С.Т. Лескин, В.И. Слободчук, А.С. Шелегов, 2016

тации АЭС показывают, что разработанные алгоритмы позволяют обнаружить отклонения в работе ГЦН на ранней стадии развития нарушения с определением первопричины его возникновения.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМОЙ

Разнообразие средств контроля, наличие трудно учитываемых связей между отдельными элементами оборудования, наложение процессов различной природы приводит к необходимости рассматривать оборудование АЭС как сложную систему, важным качеством которой является наличие интегративных свойств, не выводимых непосредственно из известных (наблюдаемых) свойств элементов системы и способов их соединения. В силу этого анализ ее поведения следует искать в рамках системного подхода с использованием методов распознавания образов [18].

Состояние данного типа оборудования представляется положением вектора $X = \{x_i\}_{i=1,N}$ в N -мерном пространстве, где N – число измеряемых технологических параметров объекта.

В классической постановке задачи распознавания образов [19] для построения классификатора состояний объекта необходима априорная информация, определяющая его нормальный и аномальный режимы работы. Анализ предаварийных ситуаций показал [18], что в большинстве случаев технологические параметры до развития аварийного процесса находятся в эксплуатационных пределах, и нет надежной информации о времени появления аномалий в состоянии оборудования.

Стратегия решения задачи может быть определена из следующих особенностей АЭС. Ответственное оборудование АЭС дублируется, в частности,

- в ВВЭР-1000 – четыре петли, четыре ГЦН, которые работают параллельно в идентичных условиях; изменение состояния каждого насоса во времени (совокупность N параметров технологического контроля) определяется общей причиной – поведением реакторной установки в целом, а также индивидуальными особенностями эксплуатации каждого ГЦН;

- авария с ГЦН – довольно редкое событие;

- вероятность одновременного выхода из строя двух или более насосов значительно меньше вероятности появления одного аномального ГЦН.

Таким образом, в формальной постановке задачи, если из G параллельно работающих объектов поведение $(G - 1)$ во времени идентично, а одного отличается, то его состояние считается аномальным.

Аномальное состояние в зависимости от его природы должно проявляться в различных группах параметров по-разному. Вследствие этого для идентификации состояния некоторые компоненты вектора X могут быть малоинформативными и являются «шумом», подлежащим фильтрации. Поэтому из общего числа N измеряемых параметров необходимо выделить только те, которые прямо или косвенно относятся к аномалии в состоянии ГЦН. Назовем их информативными параметрами. На основании принятых положений алгоритм анализа состояний оборудования должен включать в себя

- отбор информативного комплекса параметров;

- представление состояния одновременно работающего оборудования в каждый момент времени в удобном для анализа виде;

- идентификацию аномалий.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОТБОРА ИНФОРМАТИВНОГО КОМПЛЕКСА ПАРАМЕТРОВ

Проведенные исследования [18] показали, что наиболее эффективным для решения задачи распознавания аномалий в состоянии ГЦН является подход, основанный на ги-

потезе существования компактных множеств (классов) в пространстве измеряемых в процессе эксплуатации параметров объекта. Совокупность элементов каждого из классов, объединенных в смысле некоторой меры близости, определяет процесс, который может быть общим для всей системы, состоящей из G единиц идентичного оборудования, т.е. является общим режимом работы всех ГЦН. Элементы (параметры), не входящие в класс «общего режима» и образовавшие в пространстве параметров отдельные классы, определяют отличные от общего режима состояния оборудования (ГЦН).

Пусть имеется в качестве исходной информации некоторая матрица $[r(x_i, x_j)]$, например, матрица корреляции. Введем в рассмотрение N -мерное пространство $\mathbf{E} = \mathbf{A} \cup \mathbf{B}$, где \mathbf{A} – подпространство, определяющее состояние системы G объектов как целого (общий режим); $\mathbf{B} = \mathbf{E} \setminus \mathbf{A}$ – подпространство параметров, не вошедших в класс.

В пространстве \mathbf{E} i -ой строке матрицы соответствует точка с координатами $\{r(x_i, x_1), r(x_i, x_2), \dots, r(x_i, x_N)\}$.

Определим расстояние в \mathbf{E} между двумя параметрами x_i и x_j как

$$R(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^N [r(x_i, x_p) - r(x_j, x_p)]^2}, \quad (1)$$

где $r(x_i, x_p)$ – коэффициент корреляции между параметрами x_i, x_p .

Функция $R(x_i, x_j)$ – мера близости параметров x_i и x_j , используемая для классификации. Объединение параметров в пространстве, на котором определена $R(x_i, x_j)$, осуществляется с помощью алгоритма последовательного выделения наиболее удаленных точек (параметров) от всей совокупности параметров, описывающих общий режим (множество \mathbf{A}). На первом шаге вычисляется сумма расстояний каждого элемента множества до всех остальных. Определяется наиболее удаленный элемент.

Гипотеза о принадлежности i -го параметра множеству \mathbf{A} ($x_i \notin \mathbf{B}$) отвергается на уровне значимости $\alpha = 0.05$, если

$$t_i > Z_m, \quad (2)$$

где $t_i = (R_i - R_m)/\sigma$; R_i – расстояние точки i до множества точек \mathbf{A} ; R_m – среднее расстояние между точками множества; σ – оценка среднеквадратичного отклонения; $Z_m = 1.96$; $m = N - 2$.

Выделение параметров, не принадлежащих множеству \mathbf{A} , происходит до тех пор, пока будет удовлетворяться критерий (2). Выделенное множество \mathbf{B} , элементы которого не принадлежат множеству \mathbf{A} , проверяется на наличие классов или компактных множеств с плотностью элементов не ниже, чем плотность элементов в \mathbf{A} .

$$p(\mathbf{B}) \geq p(\mathbf{A}). \quad (3)$$

Классификация заканчивается, когда будут выделены все классы на множестве \mathbf{B} , удовлетворяющие условию (3). Для каждого класса определяется «представитель». Представителем класса (множества) является параметр, имеющий минимальную сумму «расстояний» (1) до всех элементов этого класса. Другими словами, это параметр наиболее связанный (в смысле меры близости (1)) со всеми остальными, входящими в его класс. Для описания поведения системы, состоящей из G объектов, можно воспользоваться анализом поведения вектора, компоненты которого – представители классов, а среди множества классов выделить класс, наиболее удаленный от всех остальных, и предположить существование аномального процесса, который описывается параметрами, входящими в этот класс. В принятой интерпретации – информативные параметры.

СОКРАЩЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ИСХОДНОГО ПРОСТРАНСТВА ПАРАМЕТРОВ. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ ВО ВРЕМЕНИ

Для анализа поведения во времени информативного вектора и определения, описывает ли выделенный комплекс параметров аномальный процесс, необходимо представить его в рассматриваемом промежутке времени в наглядном для принятия решения виде.

Для этой цели воспользуемся линейным преобразованием пространства – разложением Карунена-Лоева [20].

В каждый i -момент времени состояние k -го ГЦН представляем вектором X_{ik} , компоненты которого – отобранные на предыдущем этапе информативные параметры, описывающие некоторый процесс. В силу этого, компоненты вектора могут быть связаны между собой, поэтому пространство, в котором представлено множество векторов $\{X_{ik}\}$, неортогонально.

Используем линейное преобразование

$$X_{ik} = \sum_{j=1}^N C_{ij} \Phi_j, \quad (4)$$

где $i = 1, \dots, Q$; $k = 1, \dots, 4$; Q – объем выборки (число измерений по каждому ГЦН); $j = 1, 2, \dots, N$ – размерность вектора информативных параметров.

Преобразование (4) в распознавании образов называется разложением Карунена-Лоева [20] (чаще встречается под названием метода главных компонент). Здесь C_{ij} – случайные коэффициенты, обладающие свойством $E\{C_{ij}\} = 0$ (E – символ математического ожидания); Φ_j – элемент матрицы преобразования.

Выражение (4) представляет собой разложение вектора по базису, т.е. по системе ортонормированных базисных векторов, которая определяется из уравнения

$$R \Phi_j = \lambda_j \Phi_j,$$

где R – корреляционная матрица, оцененная по выборке $[Q, N]$; Φ_j и λ_j – собственные векторы и собственные значения корреляционной матрицы.

Представлением исходного вектора X_{ik} в новой системе координат будут коэффициенты разложения (4)

$$C_{ik} = \Phi^T X_{ik}, \quad (5)$$

где Φ^T – транспонированная матрица преобразования.

Основная идея, лежащая в основе рассматриваемых преобразований, заключается в том, что разложение (4) минимизирует среднеквадратичную ошибку при использовании лишь конечного числа базисных функций. Другими словами, в новых координатах состояние объекта может быть описано меньшим числом переменных. При этом ошибка описания среди подобных преобразований будет минимальна. Преобразования (4), (5) не изменяют суммарную дисперсию исходных данных.

Согласно оптимальным свойствам разложения, вклад каждого собственного вектора (главной компоненты) в описание дисперсии исходных данных пропорционален собственному значению $V_r = \lambda_r / M$, где λ_r – собственное значение r -го главного компонента; M – сумма N значений λ_r .

Таким образом, собственный вектор корреляционной матрицы, имеющий максимальное собственное значение, описывает направление наибольшей дисперсии исходных данных. Поведение ГЦН во времени представляется проекцией информативного вектора на собственный вектор C_1 корреляционной матрицы, имеющий максимальное собственное значение

$$y_{ik} = (C_1 \cdot X_{ik}), \quad (6)$$

где скобки означают скалярное произведение векторов.

Значения y_{ik} содержат как общий режим работы всей группы одновременно работающих ГЦН, связанный, например, с режимом работы АЭС, так и индивидуальный режим работы каждого из них.

Для наглядного представления и сравнения состояний насосов используется квадрат отклонения проекции (6) от общего режима:

$$D_{ik} = (y_{ik} - w_i)^2, \quad i = 1, 2, \dots, Q. \quad (7)$$

В качестве общего режима системы G объектов может быть принято среднее значение

$$w_i = \frac{1}{G} \sum_{k=1}^G y_{ik},$$

где G – число одновременно работающих ГЦН ($G = 4$).

Представленные алгоритмы реализованы в программном комплексе DINA-1 на алгоритмическом языке PASCAL.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГЦН КАЛИНИНСКОЙ АЭС С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА DINA-1

Исходной посылкой начала работ послужило беспокойство персонала АЭС по поводу повышенной вибрации ГЦН-2 первого блока Калининской АЭС. По показаниям системы виброакустического контроля ГЦН и главных циркуляционных трубопроводов

– средняя амплитуда смещения по крестовине электродвигателя (радиально) составляла 108.9 мкм, что, согласно инструкции по эксплуатации, следует отнести к еще допустимой;

– средняя амплитуда смещения главного упорного подшипника (радиально) составляла 69.9 мкм, что является допустимым значением, но превышающим перемещения по другим ГЦН более чем в два раза.

Анализировался период работы АЭС с 18.01.1991 по 29.04.1992 гг., т.е. до планового предупредительного ремонта (ППР) и после него. Во время ППР проводилась балансировка насосного агрегата.

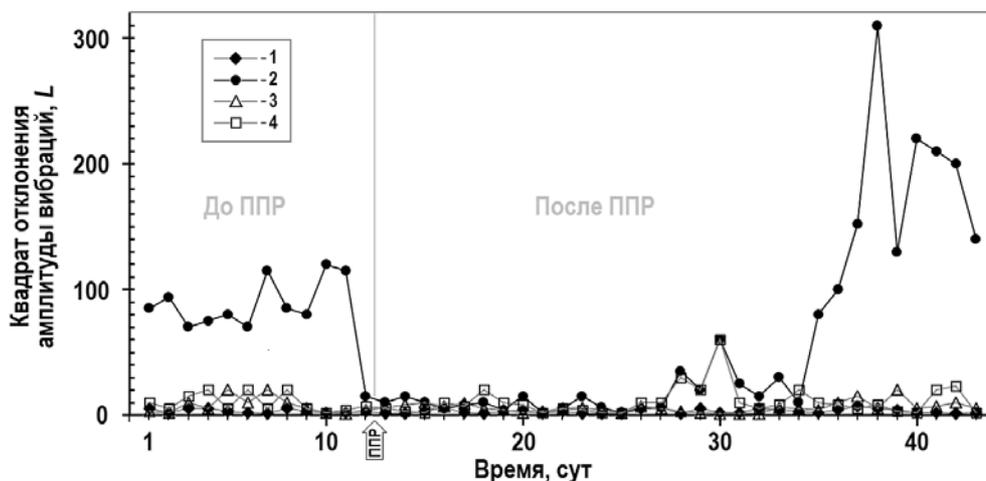


Рис. 1. Изменение квадрата отклонения амплитуды вибраций (L) для ГЦН на первом блоке Калининской АЭС с 18.01.1991 по 29.04.1992: 1 – ГЦН-1; 2 – ГЦН-2; 3 – ГЦН-3; 4 – ГЦН-4

Изменение вибрационных характеристик ГЦН-2 первого блока во времени представлено на рис. 1, где точки для первых 12-ти суток отражают вибросостояние ГЦН до ППР, а последующие – вибросостояние ГЦН после ППР. Как видно, балансировка агрегата дала лишь временное улучшение его виброхарактеристик.

В этот период работы проводился анализ состояния ГЦН-2 эксплуатационным персоналом, поэтому данные о его работе собирались особенно тщательно. Выводов относительно того, можно ли считать состояние ГЦН-2 аномальным, сделано не было. Для оценки возможностей разработанных методов анализа данных оперативного технологического контроля при диагностике ГЦН было предложено использовать данные именно этого периода.

В процессе эксплуатации измеряется 45 технологических параметров, характеризующих работу ГЦН. По описанной в предыдущем разделе методике выделялись информативные параметры, изменение совокупности которых во времени представляется характеристическим параметром D (7) и показано на рис. 2.

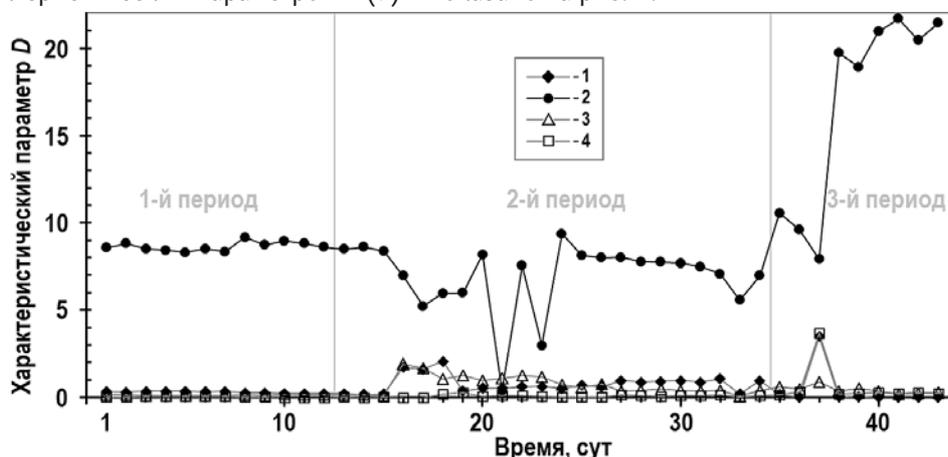


Рис. 2. Изменение характеристического параметра D для ГЦН с 18.09.1991 по 29.04.1992 на первом блоке Калининской АЭС: 1 – ГЦН-1; 2 – ГЦН-2; 3 – ГЦН-3; 4 – ГЦН-4

Полученные с помощью разработанного комплекса программ результаты показывают, что состояние ГЦН-2 аномально на протяжении всего рассматриваемого временного интервала с 18.01.1991 по 29.04.1992 гг.

Обращает на себя внимание наличие трех периодов его работы.

Первый период (сутки 1 – 12) – отличие состояния ГЦН-2 от остальных. Это период работы до планового предупредительного ремонта.

Второй период (сутки 13 – 34) – по вибрационным характеристикам ГЦН-2 не отличается от остальных (рис. 1), но его состояние по комплексу технологических параметров по-прежнему остается аномальным (рис. 2).

Третий период (сутки 35 – 43) – резкое развитие аномалии на фоне резкого увеличения вибраций ГЦН-2.

Информативный комплекс параметров, описывающий состояние ГЦН-2 на всем рассматриваемом временном интервале, представлен в табл. 1, откуда видно, что информативные параметры относятся к блоку уплотнений (17), автономному контуру (22, 44), температурному состоянию электродвигателя (21) и главного упорного подшипника (ГУП, 28).

Результаты ревизии выемной части ГЦН-2, проведенной в период планово-предупредительного ремонта (с 22.11.1991 по 27.01.1992 гг.), показали необходимость капитального ремонта блока уплотнений, небольшого ремонта ГУП. Кроме того, устранены неисправности в электродвигателе.

Таблица 1

Комплекс информативных параметров ГЦН-2 Калининской АЭС, блок №1

№ параметра	Параметр
3	Давление на нагнетании ГЦН
17	Температура запирающей воды на выходе из ГЦН
21	Температура холодного воздуха в электродвигателе
22	Температура автономного контура на входе в ГЦН
28	Температура металла главного упорного подшипника (верх)
44	Температура автономного контура на выходе из ГЦН

Последующий анализ состояния ГЦН-2 в период с 03.02.1992 по 15.01.1993 гг. до следующего ППР показал, что его состояние отличается нестабильностью и периодическим проявлением аномалии. Впоследствии ГЦН-2 оказался в аварийном состоянии и был выведен в капитальный ремонт.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ГЦН ПЯТОГО БЛОКА НВАЭС ПЕРЕД НАРУШЕНИЕМ РЕЖИМА РАБОТЫ ГЦН

Нарушение произошло вследствие повреждения торсионной муфты 5ГЦН-1 по механизму усталостного разрушения в результате циклических изгибных напряжений в шлицевой части из-за расцентровки вала двигателя и насоса в процессе эксплуатации.

Анализ данных эксплуатации ГЦН пятого блока НВАЭС перед разрушением торсиона 14.05.1999 г. на ГЦН-1 осуществлялся в период с 03.03.1999 по 13.05.1999 гг. Единственная сохранившаяся информация – распечатки 12-ти технологических параметров, значения которых регистрируются один раз в смену. Перечень десяти достоверных параметров представлен в табл. 2. Измерения температуры воздуха, охлаждающего электродвигатель, пришлось исключить из анализа как недостоверные.

Таблица 2

Основные параметры технологического контроля ГЦН-1 пятого блока НВАЭС

№ параметра	Параметр
1	Перепад давления на ГЦН
2	Расход запирающей воды на входе
3	Расход запирающей воды на сливе
4	Давление за первой ступенью
5	Давление запирающей воды на выходе
6	Давление входа в гидростатический подшипник
7	Перепад на гидростатическом подшипнике
8	Температура запирающей воды на сливе
9	Давление масла перед ГЦН
10	Температура масла на входе

На основании разработанных методов для полного анализа состояния ГЦН представленных данных явно недостаточно, поэтому рассматривалось изменение всей совокупности десяти параметров во времени без предварительного отбора информативных параметров, как это делалось при анализе работы ГЦН Калининской АЭС.

Состояние ГЦН-1 пятого блока НВАЭС на всем рассматриваемом временном интервале по комплексному показателю (7) нестабильно и отличается от одновременно работающих с ним насосов в среднем в два раза. С 20.04.1999 г. его состояние резко ухудшилось и оставалось таковым до разрушения торсиона 14.05.1999 г. Изменение состояния всех четырех ГЦН пятого блока НВАЭС показано на рис. 3. Здесь в качестве характеристики состояний насосов вводится диагностический признак

$$H_{ik} = D_{ik} / D_k \quad (8)$$

где D_{ik} – квадрат отклонения от общего режима работы всех одновременно работающих ГЦН (7); $i = 1, 2, \dots, G$ – число одновременно работающих ГЦН ($G = 4$); k – номер точки (время).

$$D_k = \frac{1}{G-1} \sum_{i=1, i \neq j}^G D_{ik}, \quad D_{jk} = \max\{D_{ik}\}_{i=1,2,\dots,G}.$$

При нормальном состоянии ГЦН в данный момент времени отношение (8) для всех насосов приблизительно равно единице.

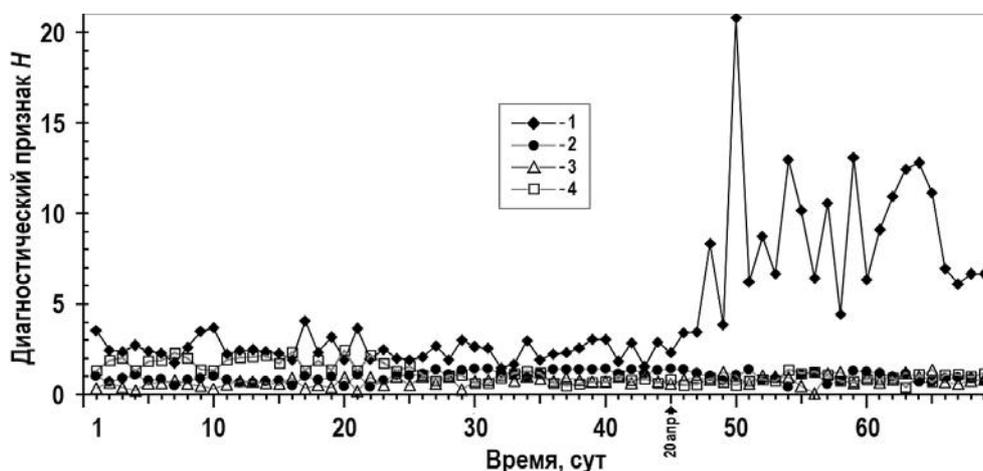


Рис. 3. Изменение диагностического признака H с 03.03.1999 по 14.05.1999 для ГЦН пятого блока НВАЭС: 1 – ГЦН-1; 2 – ГЦН-2; 3 – ГЦН-3; 4 – ГЦН-4

Как видно из рисунка, состояние ГЦН-1 за рассматриваемый период отличается от остальных насосов приблизительно в два раза. За месяц работы до нарушения его состояние становится явно аномальным с резкой сменой режимов. По всей видимости, следует предположить, что в этот период ГЦН работал в режиме циклических нагрузок.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны метод и алгоритмы раннего обнаружения аномалий в состоянии главных циркуляционных насосов ВВЭР. Алгоритмы реализованы программным комплексом DINA-1.

2. При анализе состояния ГЦН-2 первого блока Калининской АЭС в период его повышенной вибрации обнаружено отклонение в техническом состоянии ГЦН. Анализ информативных параметров указал на возможную причину аномалии. Полученные результаты были подтверждены при проведении ревизии в период планово-предупредительного ремонта.

По результатам анализа параметров ГЦН пятого блока НВАЭС в период март – май 1999 г. (разрушение ГЦН-1 14.05.1999г.) выявлено, что аномальное состояние ГЦН-1 наступило в апреле и постоянно ухудшалось вплоть до аварийного отключения насоса.

3. Разработанный метод и алгоритмы анализа состояния ГЦН ВВЭР-1000 позволяют определить аномалию в состоянии насосов по данным эксплуатации задолго до обнаружения нарушений нормальной эксплуатации штатными системами контроля.

Литература

1. *Ujita Hiroshi*. A probabilistic analysis method of evaluate the effect of human factors on plant safety. - // Nucl.Tehmol. – 1986. – Vol. 76. – No. 3. – PP. 370-376.
2. Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and applications / Eds Patton R., Frank P., Clarc R. – Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NY. – 1989.
3. *Willsky A.S.* A Survey of design methods for failure detection in dynamic systems // Automatica. – 1976. – Vol. 12. – PP. 601-611.
4. *Iserman R.* Process fault detection based on modeling end estimation metods – a survey // Automatica. – 1984. – Vol. 20. – № 4. – PP. 387-404.
5. *Basseville M.* Detecting changes in signal and systems - a survey // Automatica. – 1988. – Vol. 24. – № 3. – PP. 309-326.
6. *Frank P.M.* Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – a survey and some new results // Automatica. – 1990. – Vol. 26. – № 3. – PP. 459-474.
7. *Reisen C., Marshall E.* Evaluating operator support system in realistic conditions at hammlab // Nuclear Engineering International. – 1988. – Vol. 33. – № 402. – PP. 39-41.
8. *Абагян А.А., Дмитриев В.М., Клебанов Л.А., Крошилин А.Е., Ларин Е.П., Морозов С.К.* Система контроля и диагностики режимов работы энергоблока АЭС. // Атомная энергия. – 1987. – Т.63. – Вып. 5. – С. 311-315.
9. *Long A.* Computerized operator decision aids // Nuclear Safety. – 1984. – Vol. 25. – No. 4. – PP. 512-524.
10. *Herbert M.R.* A review of on-line diagnostic aids for nuclear power plant operators. // Nucl. Energy. – 1984. – Vol. 23. – № 4. – PP. 259-264.
11. *Павелко В.И.* Обзор приложений методологии экспертных систем в атомной энергетике. // Атомная энергия. – 1990. – Вып. 11. – С. 1-8.
12. *Weiss S., Reagan W., Roe J.* Experience with operator aids for nuclear power plants in the USA. - In: Proc. Intern. Conf. on Man-Machine Interface in Nuclear Indastry. Tokyo, 15-19.02.1988, Vienna, 1988, PP. 323-329.
13. *Urig Robert E.* Potential application of nuclear networks to nuclear power plants. Proc.Amer.Power Conf.. Vol. 53. Pt.2 53rd. Annu Meet., Chicago, III., Apr. 29-May 1. – 1991. – PP. 946-951.
14. *Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989.
15. *Fukunaga K.* Introduction to statistical pattern recognition. – Academic press, New York and London, 1972.
16. Классификация и кластер / Под ред. Дж. Вэн Райзина. – М.: Мир, 1980.
17. *Tao Gu, Tou J.T.* A new criterion for optimal classification. // Pattern Recognition. – 1982. – № 2. – PP. 1063-1065.
18. *Лескин С.Т.* Разработка алгоритмов распознавания аномалий в состоянии оборудования АЭС по анализу данных оперативного технологического контроля. // Известия вузов. Ядерная Энергетика. – 1997. – № 4. – С. 4-12.
19. *Вапник В.Н., Червонинкис А.Я.* Теория распознавания образов. – М.: Наука, 1974.
20. *Ту Дж., Гонсалес Р.* Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978.

Поступила в редакцию 02.09.2016 г.

Авторы

Лескин Сергей Терентьевич, профессор, д-р техн. наук

E-mail: STLeskin@mephi.ru

Слободчук Виктор Иванович, доцент, канд. техн. наук

E-mail: slobovic@mail.ru

Шелегов Алексей Сергеевич, доцент, канд. техн. наук

E-mail: a_shelegov@mail.ru

UDC 621.039; 62-932.2

ANALYSIS OF VVER-1000 MAIN CIRCULATION PUMP CONDITION UNDER OPERATION

Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering,
National Research Nuclear University «MEPhI»
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga Reg., 249030 Russia

ABSTRACT

A method and algorithms are presented for detecting the abnormal condition of the main circulation pumps based on their on-power testing results. The methodological basis of the algorithms is the presentation of the nuclear power plant equipment as a complicated system described by the N -dimensional vector in the condition space.

Let us represent the condition of certain equipment by the vector $\mathbf{X} = \{x_i\}$ in the N -dimensional space, where N is the number of technological parameters measured for this equipment.

A definition of an informative set of technological parameters of all N measured parameters (directly or indirectly related to the accident process) is necessary for possible interpretation of the results, for analysis of the reasons of the accident condition formation, and for the accumulation of the statistics which is necessary for improvement of the diagnostics model.

Thus, the diagnostics algorithm should include:

- selection of the informative set of parameters,
- at each time interval presentation of the condition of simultaneously operating equipment in a form convenient for the analysis,
- identification of abnormalities.

The informative vector should be presented in a convenient form to make decisions based on the analysis of its behavior in time and also to determine whether the parameters of this vector describe an abnormal process of the system. We use the Karhunen-Loeve transform which is known as the space linear transformation (principal components method).

The MCP behavior in time is described by a projection of the informative vector on the eigenvector \mathbf{C}_1 of the correlation matrix having the maximal eigenvalue $y_{ik} = (\mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{X}_{ik})$, where the parenthesis denotes a scalar product of the vectors.

The efficiency of these algorithms has been demonstrated by their application for detecting abnormalities in the main circulation pump operation at the Novovoronezh and Kalinin nuclear power plants.

Key words: main circulation pumps (MCP) operation and diagnostics, MCP abnormal condition, set of informative criteria, Karhunen-Loeve transform.

REFERENCES

1. Ujita Hiroshi. A probabilistic analysis method of evaluate the effect of human factors on plant safety. *Nucl. Technol.*, 1986, v.76, no. 3, pp. 370-376.
2. Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and applications. Edited by Patton R., Frank P., Clarc R. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NY, 1989.
3. Willsky A.S. A Survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*. 1976, v. 12, pp. 601-611.
4. Iserman R. Process fault detection based on modeling end estimation methods – a survey. *Automatica*. 1984, v.20, no.4, pp. 387-404.
5. Basseville M. Detecting changes in signal and systems – a survey. *Automatica*. 1988, v. 24,

no. 3, pp. 309-326.

6. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – a survey and some new results. *Automatica*. 1990, v. 26, no. 3, pp. 459-474.

7. Reisen C., Marshall E. Evaluating operator support system in realistic conditions at HAMMLAB. *Nuclear Engineering International*. 1988, v. 33, no. 402, pp. 39-41.

8. Abagyan A.A., Dmitriev V.M, Klebanov L.A., Kroshilin A.E., Larin E.P., Morozov S.K. *Monitoring and diagnostics systems for nuclear power plant operating regimes. Atomnaya energiya*, 1987, v.63, pp. 311-315 (in Russian).

9. Long A. Computerized operator decision aids. *Nuclear Safety*, 1984, v. 25, no. 4, pp. 512-524.

10. Herbert M.R. A review of on-line diagnostic aids for nuclear power plant operators. *Nucl. Energy*. 1984, v. 23, no. 4, pp. 259-264.

11. Pavelko V.I. A review of application of expert system methodology in nuclear power engineering. *Atomnaya energiya*, 1990, v. 11, pp. 1-8 (in Russian).

12. Weiss S., Reagan W., Roe J. Experience with operator aids for nuclear power plants in the USA. In: Proc. Intern. Conf. on Man-Machine Interface in Nuclear Industry. Tokyo, 15-19.02.1988, Vienna, 1988, pp. 323-329.

13. Urig Robert E. Potential application of nuclear networks to nuclear power plants. Proc. Amer. Power Conf.. Vol. 53. Pt. 2 53rd. Ann. Meet., Chicago, III., Apr. 29-May 1. 1991, pp.946-951.

14. Aivasyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Applied Statistics: Classification and Dimensionality Reduction. Moscow. Finansy I Statistika Publ., 1989 (in Russian).

15. Fukunaga K. Introduction to statistical pattern recognition. Academic press, New York and London, 1972.

16. Classification and Clustering. Ed. J. van Ryzin. Moscow. Mir Publ., 1980 (in Russian).

17. Tao Gu, Tou J.T. A new criterion for optimal classification. *Pattern Recognition*, 1982, v. 2, pp. 1063-1065.

18. Leskin S. Algorithm development for abnormality detection of NPP equipment conditions based on technological testing results. *Izvestiya vusov. Yadernaya Energetika*, 1997, no. 4, pp. 4-12 (in Russian).

19. Vapnik V., Chervoninkis A. Pattern Recognition Theory. Moscow. Nauka Publ., 1974 (in Russian).

20. Tu J., Gonsales R. Pattern Recognition Principles. Moscow. Mir Publ., 1978 (in Russian).

Authors

Leskin Sergej Terent'evich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: STLeskin@mephi.ru

Slobodchuk Victor Ivanovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: slobovic@mail.ru

Shelegov Aleksej Sergeevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: a_shelegov@mail.ru