УДК 621.039.51

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ СВРК И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 «КАРУНД»

<u> Р.Р. Алыев, С.Т. Лескин</u>

Обнинский институт атомной энергетики филиал НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



На основе алгоритмов [2, 3] разработан программный комплекс КАРУНД, функциями которого является контроль за состоянием измерительной системы ВРК, программного обеспечения СВРК, активной зоны реактора ВВЭР-1000 и предоставление в наглядном виде информации оператору. Приведены основные режимы работы программы. Частично описан интерфейс программного комплекса КАРУНД и некоторые результаты.

Ключевые слова: состояние активной зоны реактора, канал нейтронных измерений (КНИ), система внутриреакторного контроля (СВРК), датчик прямого заряда, ДПЗ.

Key words: channel neutron measurements, in-core monitoring system, self-powerd detector, SPD, RMC, ICMS.

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «КАРУНД»

Одной из основных систем в составе АСУ ТП энергоблока ВВЭР-1000 атомной станции (АС) является система внутриреакторного контроля (СВРК). С конца 60-х – начала 70-х гг. прошлого века, когда была создана система контроля активной зоны первого поколения для ВВЭР-440 – РПН2-04 [1], системы внутриреакторного контроля прошли несколько этапов развития. В новых проектах энергоблоков с ВВЭР значительно расширены функциональные возможности СВРК вместе с повышением требований к надежности ее функционирования. В связи с этим необходима разработка новых или усовершенствованных методов и видов комплексных испытаний и контроля СВРК с применением современных информационных технологий [1]. Расширение функциональных возможностей СВРК, неминуемо, приводит к увеличению объема информации, который необходимо обрабатывать как специалистам, осуществляющим наладку и анализ работоспособности системы, так и операторам, контролирующим состояние реакторной установки. Поэтому вопрос обработки и представления информации СВРК является актуальным.

Подобные рассуждения стали предпосылкой для создания алгоритмов представления состояния активной зоны и работоспособности СВРК [2, 3], на основе которых разработан программный комплекс КАРУНД.

[©] Р.Р.Алыев, С.Т. Лескин, 2012

Для проверки достоверности рассчитываемых СВРК полей энерговыделения (ЭВ) применяются методы, описанные в [4, 5]. Они основаны на анализе поведения либо интегральных, либо локальных параметров, характеризующих состояние активной зоны (*Kq* – коэффициент неравномерности ЭВ по кассетам, *Kv* – то же по объему активной зоны, OFFSET – разность ЭВ в верхней и нижней частях активной зоны, отнесенная к полному ЭВ в активной зоне, OFED – то же, но только по показаниям ДПЗ).

Существующая система представления информации о состоянии активной зоны на энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 не исключает ошибок при ее интерпретации. Отображение параметров осуществляется с использованием цветовой схемы с малой дискретностью: нормальное состояние – один цвет, предупредительная сигнализация – второй цвет и аварийная уставка – третий. Такое представление информации не отражает динамику процессов в активной зоне, например, увеличение температуры на выходе из ТВС выше допустимого значения, падение поглощающих стержней системы управления и защиты (ПС СУЗ).

При разработке алгоритмов программного комплекса КАРУНД был выбран иной подход к обработке, интерпретации и представлению информации о состоянии измерительной системы, программного обеспечения (ПО) СВРК и активной зоны ВВЭР-1000.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «КАРУНД»

Программный комплекс КАРУНД реализован на языке Borland C++ Builder и предназначен для работы на платформе IBM PC под управлением операционной системы семейства Windows[®]. Применение методов объектно-ориентированного программирования для написания функций программы позволяет легко реализовать ее алгоритмы на платформе под управлением операционной системы семейства *nix, на которой работает ПО СВРК.

Программный комплекс обеспечивает выполнение следующих основных функций:

обращение к базе данных СВРК ВВЭР-1000 (к текущей, архиву);

 считывание параметров, необходимых для работы программы из базы данных СВРК;

 обработка показаний ДПЗ и ТП СВРК и выявление недостоверных показаний, не обнаруженных системой;

 определение отклонений в состоянии активной зоны, обусловленных физическим процессом;

 считывание данных нейтронно-физического расчета активной зоны для текущей или предыдущих топливных кампаний РУ ВВЭР-1000;

 выполнение сравнительного анализа различного ПО СВРК и оценка необходимости корректировки коэффициентов физической модели;

 предоставление в наглядной форме оперативному персоналу информации о состоянии активной зоны РУ ВВЭР-1000 и ПО СВРК.

В зависимости от задачи и режима работы в программном комплексе используются следующие исходные данные: а) массив линейного ЭВ по показаниям ДПЗ [MBT/м]; б) массив температуры на выходе из активной зоны по показаниям ТП [°C]; в) массив восстановленного СВРК поля относительного ЭВ; г) массив расчетных относительных ЭВ по программе нейтронно-физического расчета, например, БИПР-7А.

Для анализа состояния измерительной системы ВРК в программном комплексе используется метод из работы [3]. В соответствии с ним состояние измеритель-

ной системы представляется совокупностью K векторов $\{\vec{X}_i\}$ (K – число КНИ в активной зоне), компоненты каждого из них – ЭВ по показаниям измерительной системы (N = 7). С помощью линейного преобразования

$$\vec{\mathscr{V}}_{q} = \sum_{j=1}^{\prime} \mathcal{C}_{ij} \vec{\Phi}_{j}$$
 (*i* = 1,...,*K*), (*j* = 1,...,7) (1)

векторы $\{\vec{X}_i\}$ представляются в ортогональной системе координат базисных векторов, которые определяются из уравнения

$$R \cdot \vec{\Phi}_{i} = \lambda_{i} \vec{\Phi}_{i}. \tag{2}$$

Преобразование (1) в распознавании образов называется разложением Карунена-Лоэва. C_{ij} – коэффициенты разложения; R – корреляционная матрица, оцененная по выборке [K, N]; $\vec{\Phi}_j$ и $\vec{\lambda}_j$ – собственные векторы и собственные значения корреляционной матрицы. Представлением исходного вектора измерений \vec{X}_i

в новой системе координат будут коэффициенты разложения

$$\vec{\mathcal{L}}_{i} = \boldsymbol{\Phi}' \cdot \vec{X}_{j}, \tag{3}$$

где Ф' – транспонированная матрица преобразования.

Основная идея рассматриваемого преобразования заключается в том, что разложение минимизирует среднеквадратичную ошибку при использовании лишь конечного числа базисных векторов.

В новой системе координат (первых двух главных компонентах) состояние активной зоны и измерительной системы СВРК в отсутствие аномалий представляется достаточно компактным множеством (классом). При этом ошибка описания будет минимальной. Появление измерений, не входящих в этот класс, определяется либо недостоверными показаниями измерительной системы, либо проявлением локального физического процесса. Отклонения в состоянии определяются с доверительной вероятностью 95%, что изначально заложена в свойствах используемого в алгоритмах принципа распознавания образов [6–8].

Анализ состояния ПО СВРК выполняется с использованием того же разложения (1). Базисные векторы определяются по корреляционной матрице, компонентами которой являются векторы восстановленного СВРК поля ЭВ, рассчитанные по одной из программ нейтронно-физического расчета значения ЭВ (эталонное поле) в тех же точках. Эвклидово расстояние между значениями восстановленного и эталонного поля ЭВ в одинаковых точках в новой системе координат и определяет состояние ПО СВРК [3].

Представление информации о состоянии активной зоны реакторов ВВЭР-1000 [2] позволяет осуществлять контроль, используя только показания датчиков СВРК, при этом анализируются результаты измерений ЭВ (ДПЗ) и системы температурного контроля (ТП). Состояние активной зоны в некоторый момент времени t_0 представляется связным неориентированным ациклическим взвешенным графом (деревом) [9–11]

$$G = (V, E, y), \tag{4}$$

где V = {v_i}, i = 1, N – множество вершин (измерительных каналов); N – число вершин дерева; E \subset V×V – подмножество пар (v_i, v_j), v_i \subset V, v_j \subset V – множество ребер; y – весовая функция, ставящая в соответствие каждой паре вершин дерева некоторое число, характеризующее «близость» параметров в пространстве измерений, совокупность которых характеризует данное состояние активной зоны. Веса ребер (см. [2]), соединяющих соседние вершины *i* и *j*, выбираются в соответствии с правилом

$$Y_{ii} = \min\{y_{ik}\}, k = 1, N, k \neq i,$$
 (5)

где y_{ik} — значения весовой функции для пары вершин *i*, *k*; *N* — число измерительных каналов (КНИ и термопар). Тогда граф *G* с учетом (5), согласно определению, является минимальным остовным деревом G^0 , однозначно представляющим состояние активной зоны.

Далее, в следующие моменты времени t_m или для следующих состояний активной зоны, которые для условности назовем текущими, строится дерево, изоморфное эталонному. Сравнением с эталоном находятся наиболее деформированные части графа нового состояния [2] в соответствии с

$$R_i = \frac{\xi_i(t_m)}{\xi_i(t_0)}, \qquad (6)$$

Интерес представляют те узлы, деформация *R_i* которых превышает заранее заданную величину, определяемую по опыту эксплуатации активной зоны.

Метод [2] очень эффективен при отказах измерительной системы контроля положения ПС СУЗ для определения их «сползания», падения в активную зону. Это объясняется тем, что промежуточное положение ПС СУЗ лучше всего определять по анализу показаний ДПЗ СВРК, а крайние положения – по показаниям ТП. Представленный алгоритм позволяет объединить эти два взаимно дополняющие средства, автоматизировать аналитическую обработку показаний и представить результат в наглядном виде.

ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «КАРУНД»

На рисунке 1 представлено основное рабочее окно программы КАРУНД. На графике в левом верхнем углу главного окна отображается мощность РУ (красный график), относительный расход теплоносителя через активную зону реактора (фиолетовый график), положение рабочей Х группы ОР СУЗ (синий график); в правой части – основные параметры текущего состояния активной зоны.

Результаты обработки данных представляются на графике в левом нижнем углу главного окна программного комплекса КАРУНД, а также на картограмме активной зоны в центральной части основного окна. На картограмме отображаются ТВС с измерительными каналами в нормальном состоянии (белый цвет), в аномальном

состоянии 333 с пониженным уровнем относительного ЭВ, ТВС с повышенным

уровнем относительного ЭВ и ТВС без средств контроля . Критерий для выбора аномальных показаний измерительной системы может быть выбран любой. В процессе опытной эксплуатации программного комплекса хорошо зарекомендовал себя критерий согласия χ^2 [12–13].

В программном комплексе КАРУНД существует функция анализа ПО СВРК (рис. 2). Возможность работы подпрограммы «Анализ СВРК» в динамическом режиме позволяет работать с текущими данными СВРК и вести динамический контроль за состоянием измерительной системы и ПО СВРК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Одной из тестовых задач является определение положения ОР СУЗ. В программном комплексе КАРУНД это выполняется двумя алгоритмами [2, 3]. Первый алгоритм использует показания КНИ и ТП СВРК, а второй – только показания ДПЗ.

БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ



Рис. 1. Основное рабочее окно



Рис. 2. Рабочее окно функции «Анализ СВРК»

На рисунке 1 показан сход с верхнего положения ОР СУЗ в ТВС № 153 на 27%. То, что движение ОР СУЗ имело место, подтверждает и аномалия в показаниях КНИ в ТВС № 152 и 154, определенная по алгоритмам [3]. То же состояние обработано в соответствии с алгоритмами [2], результат представлен на рис. 3. Изменение положения ОР СУЗ в ТВС 153 подтверждается деформацией в сторону уменьшения поля ЭВ в ней и окружающих ТВС. Известия вузов • Ядерная энергетика • №1 • 2012



Рис. 3. Основное рабочее окно



Рис. 4. Определение недостоверных показаний измерительной системы ВРК

47

Еще одна задача – определение недостоверных показаний измерительной системы, в программном комплексе КАРУНД решается в соответствии с [3].

Информация о недостоверных показаниях представляется на картограмме активной зоны (рис. 4). Показания канала измерения № 1 определены как не достоверные. Если проанализировать показания всех КНИ на данной орбите симметрии (табл. 1) ТВС №№ 81, 83, 96, то выделяются показания ДПЗ № 5 ТВС №83, которые отличаются от среднего значения показаний ДПЗ № 5 в ТВС № 81 и 96 на 27%.

На рисунке 5 представлено состояние активной зоны в режиме срабатывания ускоренной предупредительной защиты (УПЗ). В этом режиме наиболее четко

Таблица 1

Показания КНИ № 1, 2, 33

№ ДПЗ № ТВС (№ КНИ)	1	2	3	4	5	6	7
83 (1)	6.438	6.789	6.996	6.863	5.016	6.865	6.004
81 (2)	6.055	6.438	6.656	6.777	6.734	6.672	5.918
96 (33)	6.484	6.371	6.938	6.953	7.016	7.059	5.859

выделяется класс измерительных каналов, в местах расположения ОР СУЗ группы УПЗ – это каналы в ТВС № 52, 58, 82, 133.



Рис. 5. Определение недостоверных показаний измерительной системы ВРК

Из-за специфики расположения ОР СУЗ УПЗ распределение относительного ЭВ в активной зоне тоже специфично (см. рис 5), но хорошо объяснимо с физической точки зрения.

Для примера работы функции «Анализ СВРК» выполнено сравнение поля ЭВ, восстановленного ПО СВРК ВМПО «Хортица» (треугольный маркер) и модернизированной «Хортица-М» (квадратный маркер), с полем ЭВ, рассчитанным БИПР-7А (рис. 2). На рисунке 2 представлены результаты сравнения для орбиты симметрии № 13. На ней отсутствуют КНИ, поэтому результаты расчета ЭВ в ТВС на данной орбите очень зависят от коэффициентов адаптации физической модели для восстановления поля ЭВ. Как видно из рис. 2, при каждой корректировке коэффициентов адаптации результаты восстановления ЭВ на данной орбите по ВМПО «Хортица» становятся ближе к расчетам, чем результаты по ПО «Хортица-М». Стабильные более хорошие результаты расчетов по «Хортица-М» объясняются тем, что подобная корректировка коэффициентов адаптации физической модели производится постоянно, перед выполнением восстановления поля ЭВ, а не один раз в 20 суток, как для ВМПО «Хортица». Кроме этого, на рис. 2 виден общий сбой в работе ВМПО «Хортица» на всех орбитах симметрии после 158 эфф. сут. Это нарушение связано с проблемами в корректировке коэффициентов адаптации для ТВС с большой глубиной выгорания. К тому моменту в активной зоне реактора было уже достаточно большое количество ТВС с выгоранием более 50 МВт·сут/кг, в то время как ВМПО «Хортица» разрабатывалась в условиях, когда глубина выгорания ТВС чуть превышала 30 МВт.сут/кг.

вывод

Разработан программный комплекс для работы с базами данных СВРК ВВЭР-1000, обеспечивающий обработку и выявление недостоверных показаний измерительной системы ВРК, однозначную интерпретацию изменения в состоянии АЗ, сравнение и анализ ПО СВРК. Программный комплекс КАРУНД обеспечивает наглядное представление полученных результатов «оператору».

Литература

1. http://www.atesvrk.narod.ru/history.html

2. *Алыев Р.Р. Лескин С.Т.* Использование графа для представления информации о состоянии активной зоны реактора ВВЭР-1000//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 4. – С.64-71.

3. *Алыев Р.Р. Лескин С.Т*. Метод анализа работоспособности измерительной системы и программного обеспечения внутриреакторного контроля ВВЭР-1000//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 3. – С.4-12.

4. Комплексные испытания модернизированной системы внутриреакторного контроля при вводе в эксплуатацию блока №3 Калининской АЭС/ФГУП «Атомтехэнерго» Нововоронежский филиал «Нововоронежатомтехэнерго», 2007.

5. Технический отчет. Результаты исследований нейтронно-физических характеристик ВВЭР-1000 блока № 3 Калининской АЭС в процессе поэтапного освоения проектной мощности/Рег. номер ПТО КлнАЭС № 0143.

6. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978.

7. ФуК. Структурные методы в распознавании образов. – М.: Мир, 1977.

8. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов/Пер. с англ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.

9. *Кук Д., Бэйз Г*. Компьютерная математика. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1990.

10. *Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н*. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика. – М.: Мир, 1980.

11. Татт У. Теория графов. – М.: Мир, 1988.

12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1969.

13. *Кобзарь А.И*. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

Поступила в редакцию 8.02.2012

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.5: 621.362

Indirect Method of Determining the Efficiency of a Thermionic Reactor for Space \A.I. Brezhnev, E.G. Vinogradov, V.A. Linnik, M.K. Ovcharenko, A.P. Pyshko, Yu.S. Yuryev, V.I. Yarygin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 1 illustration. – References, 4 titles.

The method of determining the efficiency of the space nuclear thermionic power plant by the set of current-voltage characteristics without the direct measurement of the reactor thermal power, yet with fixing the relative thermal power for various current-voltage characteristics is described.

УДК 621.039.51

On ADS Subcritical Reactor Operation in the Reactivity Modulation Mode \A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk, A.I. Brezhnev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 9 illustrations. – References, 18 titles.

In the present paper consideration is given to the possibility of applying a pulsed reactor as a neutron-breeding target for accelerator-driven systems. It is assumed that such a reactor operates in the reactivity modulation mode similar to that of the IBR-2 reactor. In theory, it enables energy requirements for the accelerator beam to be reduced, while at the same time enhancing the safety of installations of this type.

УДК 621.039.51

Analysis of the BOR-60 Cells Utilization to Carry out Experiments \I.Yu. Zhemkov, Yu.V. Naboishchikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 12 illustrations. – References, 6 titles.

The efficiency of BOR-60 core cells and blanket utilization to carry out experiments was analyzed for the 40-year operating period. Reactor cells that are used the most often to carry out experiments as well as the parameters influencing their attractiveness were identified.

УДК 621.039.543.6

Methodology of Conversion of Plutonium of Various Isotopic Compositions to the Equivalent Plutonium as Applied to System Studies in Nuclear Power \E.M. Yatsenko, A.N. Chebeskov, V.S. Kagramanyan, A.G. Kalashnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 3 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

In this work the simplified methodology of correction of the initial enrichment, based on plutonium equivalent of uranium, plutonium, americium, neptunium, curium isotopes on loading is offered. The developed methodology, possessing comprehensible accuracy, allows not only to correct enrichment, but also to lower uncertainty degree at carrying out of system researches of atomic engineering taking into account dynamics of change of fuel isotopic composition at its multiple recycle in fast reactors.

УДК 621.039.51

Software Analysis of in-core monitoring system and reporting on the state of the reactor core of VVER-1000 KARUND\R.R. Alyev, S.T. Leskin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 13 titles.

On the basis of algorithms [2], [3] developed a software system KARUND whose function is to monitor the state of the measuring system of RMC, software in-core monitoring system, core VVER-1000 reactor, and visual representation in the form of information to the operator. Completed description of the main modes of operation of the program and. Partially, describes the interface software system KARUND and some results.

УДК 621.039.58

Lifetime NPP Equipment Management Under Ageing by System Analysis Procedures \0.M. Gulina, N.L. Salnikov, V.P. Politukov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 1 illustration. – References, 6 titles.