

МЕТОД АНАЛИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО КОНТРОЛЯ ВВЭР-1000

Р.Р. Алыев, С.Т. Лескин

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



Представлен метод, который позволяет оценивать работоспособность измерительной системы внутриреакторного контроля, проводить сравнительный анализ результатов расчета энерговыделения в активной зоне реактора ВВЭР-1000 при использовании различного программного обеспечения системы внутриреакторного контроля (ПО СВРК), выявлять недостоверные показания датчиков контроля энерговыделения (ДПЗ) и идентифицировать аномалии в состоянии активной зоны. Метод использовался для анализа данных СВРК Калининской АС. Выявлены недостоверные показания измерительной системы. Проведено сравнение ПО СВРК различных версий.

НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ СРАВНЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВРК

С точки зрения классификации аварийных ситуаций аварии на активной зоне относятся к маловероятным событиям. Вероятность их возникновения 10^{-4} – 10^{-6} на реактор-год. Однако последствия этих отказов настолько серьезны, что контролю безопасности и условиям эксплуатации активной зоны уделяется большое внимание. Критерии безопасной эксплуатации будут все более строгими, если принимать во внимание программу повышения мощности реакторных установок ВВЭР-1000 до 104%.

Основной системой, контролирующей состояние активной зоны, является внутриреакторный контроль (СВРК). Для ВВЭР-1000 в состав СВРК входит контрольно-измерительная система, которая состоит из 64 каналов измерения энерговыделения, в каждом из которых 7 ДПЗ, расположенных по высоте активной зоны, а также 95 термопар над ТВС. Одна из основных задач программного обеспечения СВРК (ПО СВРК) – восстановление объемного поля энерговыделения в активной зоне и корректировка физических коэффициентов модели активной зоны в зависимости от выгорания. Развитие вычислительной техники привело к разработке и внедрению более современного ПО СВРК. Например, в системах внутриреакторного контроля первого поколения восстановление поля энерговыделения и корректиров-

© Р.Р. Алыев, С.Т. Лескин, 2008

ка физических коэффициентов осуществлялись примерно за сутки, использование современной вычислительной техники и программного обеспечения позволяет выполнять такие же расчеты приблизительно за 4 с.

Модернизация программного обеспечения привела к тому, что на некоторых АЭС одновременно используются несколько программ расчета энерговыделения. Например, на первом блоке КЛНАЭС параллельно работает ВК с ПО СВРК «Хортица» (старая версия) и «Хортица-М» (новая версия). Использование различных программ приводит к тому, что результаты оперативных расчетов могут различаться, и их анализ затруднен из-за отсутствия объективного критерия оценки достоверности результатов восстановления поля с использованием различного ПО.

В статье представлен статистический метод оценки состояния активной зоны, анализа работоспособности и программного обеспечения СВРК. Для этой цели используется разложение Карунена-Лоэва [1].

МЕТОД АНАЛИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВРК

Анализ работоспособности СВРК, согласно представленному методу, проводится в два этапа.

На первом этапе анализируются показания измерительной системы. Выделяются данные, отличающиеся от общей закономерности распределения энерговыделения в активной зоне. Определяется, являются ли выявленные отклонения недостоверными показаниями измерительной системы или локальным физическим процессом.

На втором этапе, после отбраковки недостоверных данных измерительной системы, ПО СВРК производит восстановление поля энерговыделения по всему объему активной зоны. Для оценки адекватности модели восстановления поля энерговыделения результаты расчета ПО СВРК сравниваются в единой системе координат с результатами расчетов энерговыделения по программе БИПР-7А, аттестованным кодом физического расчета для данного типа реакторов.

Анализ состояния измерительной системы контроля энерговыделения в активной зоне реактора

Система контроля энерговыделения представляет собой 64 канала нейтронных измерений (КНИ), в каждом из которых по 7 датчиков (ДПЗ), равномерно распределенных по высоте активной зоны.

Состояние активной зоны представляем совокупностью K векторов ($K_{\max} = 64$, число КНИ в активной зоне), компоненты каждого из них – энерговыделение по показаниям измерительной системы ($N=7$). Взаимное расположение векторов множества $\{\vec{X}_i\}$ ($i = 1, \dots, K$) в N -мерном пространстве ($N=7$) определяет состояние измерительной системы СВРК и активной зоны.

В силу наличия общих закономерностей в распределении энерговыделения компоненты вектора \vec{X}_i находятся в сильной взаимной функциональной зависимости, поэтому выбранная система координат неортогональна.

С помощью линейного преобразования

$$\vec{X}_i = \sum_{j=1}^7 C_{ij} \vec{\Phi}_j, \quad (i = 1, \dots, K, \quad j = 1, \dots, 7), \quad (1)$$

где C_{ij} – коэффициенты разложения; $\vec{\Phi}_j$ – элемент матрицы преобразования, i -й элемент множества может быть представлен в ортогональной системе координат.

Данное преобразование в распознавании образов называется разложением Карунена-Лозва [1].

Линейное преобразование представляет собой разложение вектора по базису, т.е. по системе ортонормированных базисных векторов, которая определяется из уравнения

$$R \cdot \vec{\Phi}_j = \lambda_j \vec{\Phi}_j, \quad (2)$$

где R – корреляционная матрица, оцененная по выборке $[K, M]$; $\vec{\Phi}_j$ и λ_j – собственные векторы и собственные значения корреляционной матрицы.

Представлением исходного вектора измерений \vec{X}_i в новой системе координат будут коэффициенты разложения

$$\vec{C}_i = \Phi' \cdot \vec{X}_i, \quad (3)$$

где Φ' – транспонированная матрица преобразования.

Основная идея рассматриваемого преобразования заключается в том, что разложение минимизирует среднеквадратичную ошибку при использовании лишь конечного числа базисных векторов. Другими словами, в новых координатах состояние объекта может быть описано меньшим числом переменных, при этом ошибка описания будет минимальной.

Согласно свойствам разложения, вклад каждого собственного вектора в описание дисперсии исходных данных пропорционален собственному значению.

Анализ данных показал:

- более 90% всей дисперсии может быть описано одной главной компонентой (собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению);
- первая главная компонента характеризует мощность в канале измерения;
- разброс показаний по второй главной компоненте (собственный вектор, соответствующий второму по величине собственному значению) значительно меньше и определяется отношением между показаниями энерговыделения нижней и верхней частей измерительных каналов.

В новой системе координат (первых двух главных компонентах) состояние активной зоны (общая закономерность связи между изменениями энерговыделения на данном уровне мощности) представляется достаточно компактным множеством (классом) [2]. Близость определяет непротиворечивость измерений, а отклонение измерений от класса определяется либо недостоверными показаниями измерительной системы, либо проявлением локального физического процесса.

Сравнение различных ПО СВРК

Используя те же рассуждения, можно описать состояние активной зоны K точками ($K_{\max} = 163$ ТВС) в M -мерном пространстве, где $M = 16$ – число расчетных точек энерговыделения по высоте в каждой ТВС, полученных в результате физического расчета, заложенного в ПО СВРК. Для данного состояния активной зоны рассчитывается распределение энерговыделения в тех же точках по высоте для всех 163 кассет по программе БИПР-7А. Для сравнения результатов расчетов (методик) по выборке $16 \times 2 \times 163$ оценивается корреляционная матрица, и расчеты ПО «Хортица» и БИПР-7А* сравниваются в новой системе координат.

Данные функционалы значений энерговыделения, рассчитанного СВРК и БИПР-7А, подвергаются кластеризации (выделению классов, обладающих общими свойствами, например, ТВС, находящиеся на одной орбите симметрии).

* В качестве объективной оценки используются расчеты по БИПР-7А.

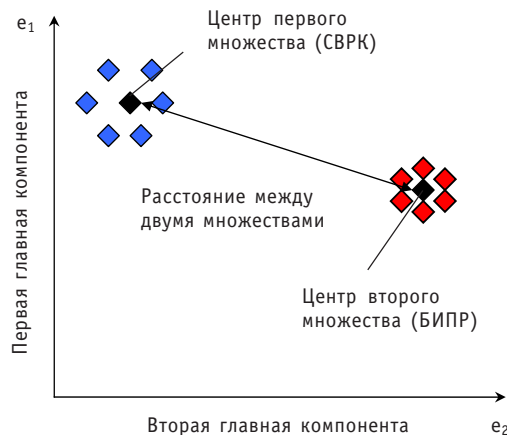


Рис.1. Пример представления двух кластеров в ортонормированной системе координат

Если для каждого момента времени получить положение класса в новой системе координат (как это показано на рис.1) и найти расстояние между центрами классов СВРК и БИПР-7А, анализируя изменение этого расстояния во времени для каждого класса, можно определить какая из используемых моделей (ПО) СВРК описывает состояние активной зоны наиболее «близко» к эталону, полученному в результате расчетов по программе БИПР-7А.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленный «метод» использовался для анализа работы СВРК на первом, втором и третьем блоках КЛНАЭС, на которых применяются различные системы внутриреакторного контроля.

На первом блоке – две системы ВРК верхнего уровня – это ВМПО «Хортица» и «Хортица-М». Обе на базе аппаратуры нижнего уровня «Гиндукуш».

На втором блоке – система ВРК ВМПО «Хортица» на базе аппаратуры нижнего уровня «Гиндукуш».

На третьем блоке – это СВРК-М с программой восстановления поля энерговыделения «Хортица-М».

Результат анализа состояния измерительной системы контроля энерговыделения в активной зоне реактора

В качестве примера работы алгоритма рассмотрена работа СВРК на втором блоке в процессе 19-ой топливной кампании (2006–2007 гг.).

Состояние активной зоны было описано совокупностью векторов, где координаты i -го вектора представлялись следующим образом.

Пусть X_{ij} – j -я координата вектора \vec{X}_i (показание ДПЗ i -го КНИ на высоте j), тогда координата вектора пересчитывается как

$$X_{ij} = X_{ij} - \bar{X}, \quad (4)$$

где \bar{X} – среднее на симметричных участках (орбитах симметрии) энерговыделение на высоте j (измерение энерговыделения датчиком j).

На картограмме, представленной на рис. 2, показано положение симметричных по физическим характеристикам ТВС.

Результат преобразования представлен на рис. 3, из которого видно, что основная часть КНИ образует достаточно плотную группу, разброс внутри группы обусловлен статистическим разбросом измерений.

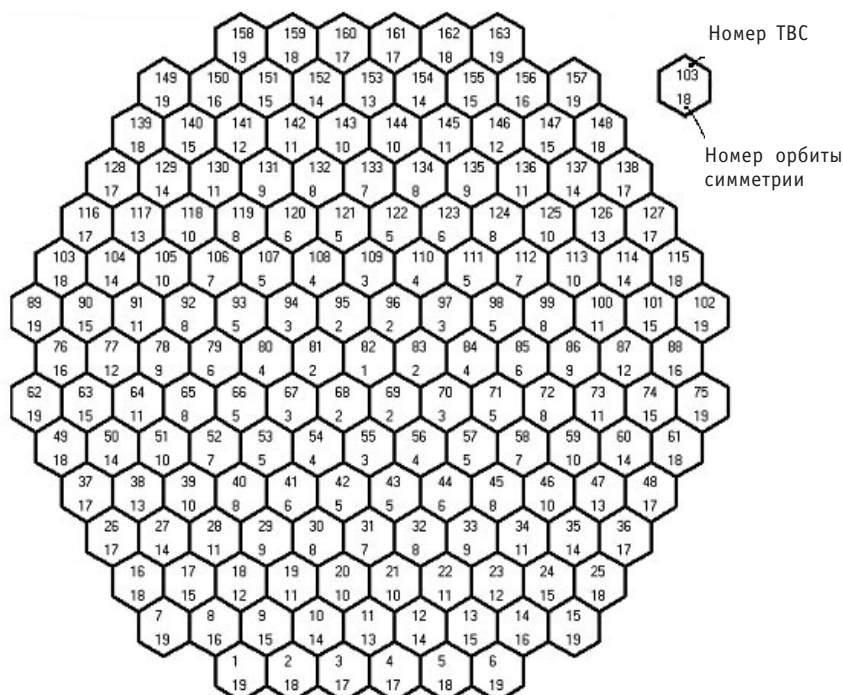


Рис. 2. Положение симметричных по физическим характеристикам ТВС

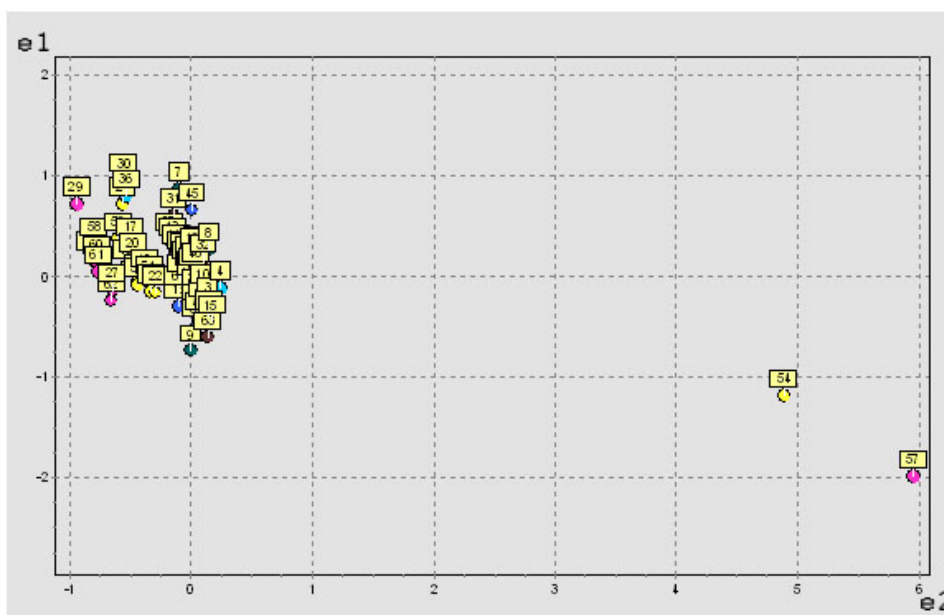


Рис. 3. Представление показаний ДПЗ в первых двух главных компонентах: II блок КЛНАЭС, 10 эфф.сут до отбраковки

Из общей группы выделяются каналы №№ 54 и 57. После анализа показаний ДПЗ в данных каналах было выявлено, что показания ДПЗ №3 в них занижены примерно на 30%.

После отбраковки этих датчиков показания СВРК стали удовлетворительными (см. рис.4).

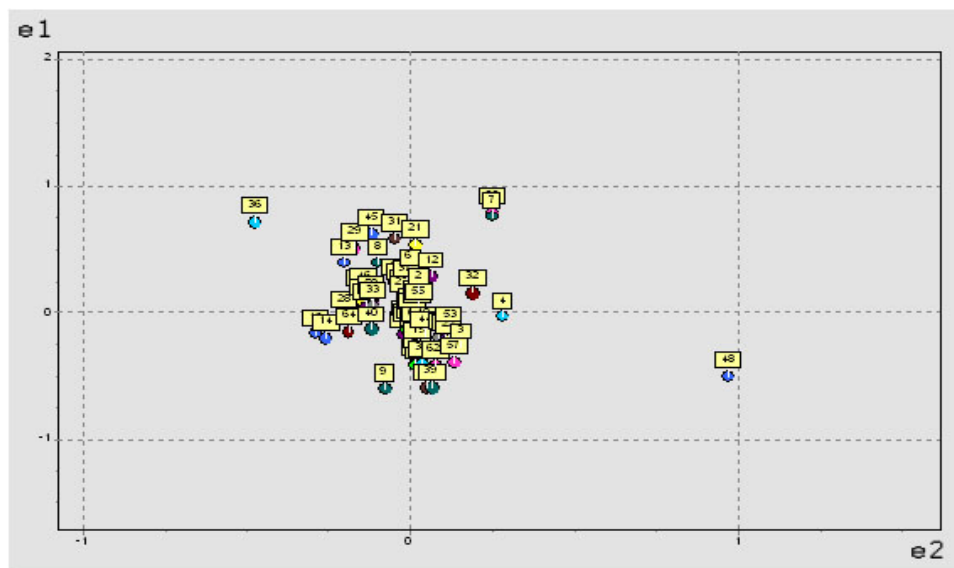


Рис. 4. Представление показаний ДПЗ в первых двух главных компонентах: II блок КлнаЭС, 10 эфф.сут после отбраковки

По результатам анализа показаний ДПЗ СВРК всех блоков КлнаЭС сделан вывод, что состояние датчиков ВРК удовлетворительное.

Результат сравнения различных видов математического обеспечения СВРК

Алгоритм сравнения работы различных вычислительных комплексов СВРК, а именно, программ восстановления поля энерговыделения, был применен к первому блоку КлнаЭС.

В качестве примера на рис. 5 представлено изменение евклидова расстояния в системе координат первых двух главных компонент во времени для двенадцатой орбиты симметрии:

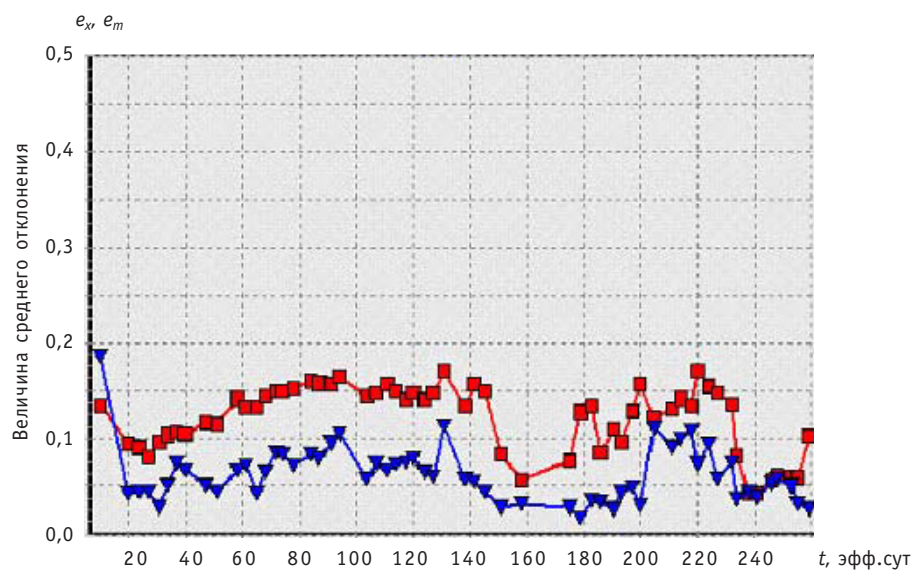


Рис. 5. Величина среднего отклонения от расчетов БИПР для различных видов ПО. Двенадцатая орбита симметрии 1 блока КлнаЭС: —■— ХМ; —▼— МПО

$$e_m = \sqrt{(Y_{m1} - Y_{b1})^2 + (Y_{m2} - Y_{b2})^2}, \quad e_x = \sqrt{(Y_{x1} - Y_{b1})^2 + (Y_{x2} - Y_{b2})^2}, \quad (5)$$

где (см. рис. 1) Y_{m1}, Y_{m2} – координаты центра класса расчетных значений энерговыделения ПО «Хортица М»; Y_{x1}, Y_{x2} – координаты центра класса расчетных значений энерговыделения ПО «Хортица»; Y_{b1}, Y_{b2} – координаты центра класса расчетных значений энерговыделения по программе БИПР-7А.

Выражения (5) характеризуют среднее отклонение расчетов, выполненных ПО СВРК, от расчетов по программе БИПР.

Из рис. 5 видно, что результаты расчетов по программе «Хортица» более правильно описывают поле энерговыделения, чем «Хортица М».

На рис. 6 и 7 представлены средние значения отклонений расчетов ПО СВРК различных версий от эталонного расчета по БИПР-7А и дисперсия этих отклонений:

$$\bar{e}_{sk} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} e_{sik}, \quad e_{sk}^2 = \frac{1}{N_k - 1} \sum_{i=1}^{N_k} (e_{sik} - \bar{e}_{sk})^2,$$

где N_k – количество измерений в течение 249 эфф. сут на k -ой орбите симметрии ($k=1, \dots, 19$); $s=x, m$.

Анализ результатов показывает, что ПО «Хортица» рассчитывает поле энерговыделения более правильно.

Пользуясь графиком рис. 7, можно определить орбиты симметрии, на которых расчетные значения энерговыделения ПО СВРК имеют большую погрешность, например, орбиты 8, 15 для ПО «Хортица М», орбита 13 для ПО «Хортица». Это может быть связано, например, с некорректным учетом в расчетах положения кластеров рабочих групп ОР СУЗ или отсутствием датчиков на данных орбитах.

На рис. 8 показан характерный пилообразный график с периодом ≈ 20 эфф. сут отклонения от расчетов БИПР-7А показаний ПО «Хортица». Такая зависимость обусловлена регламентом корректировки коэффициентов физической модели, используемой ПО «Хортица». Из графика можно сделать вывод о том, что если проводить корректировку чаще, то ПО «Хортица» будет производить восстановление поля энерговыделения еще более точно.

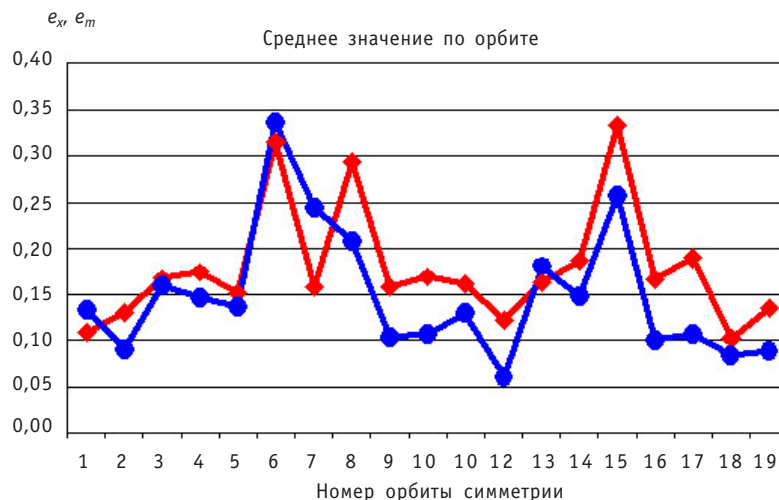


Рис. 6. Среднее значение отклонения с 0 по 259 эфф. сут. Блок №1 КлнАЭС: —♦— Хортица-М vs БИПР; —●— ВМПО vs БИПР

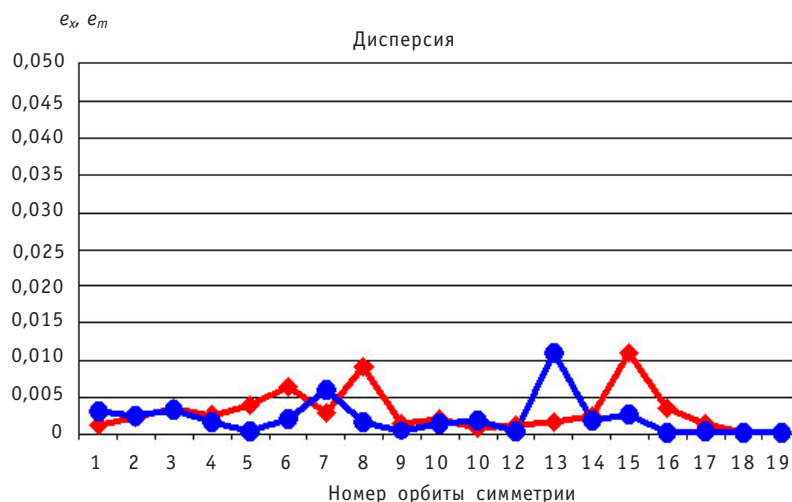


Рис.7. Дисперсия отклонения с 0 по 259 эфф. сут. Блок №1 КЛНАЭС: —◆— Хортица-М vs БИПР; —●— ВМПО vs БИПР

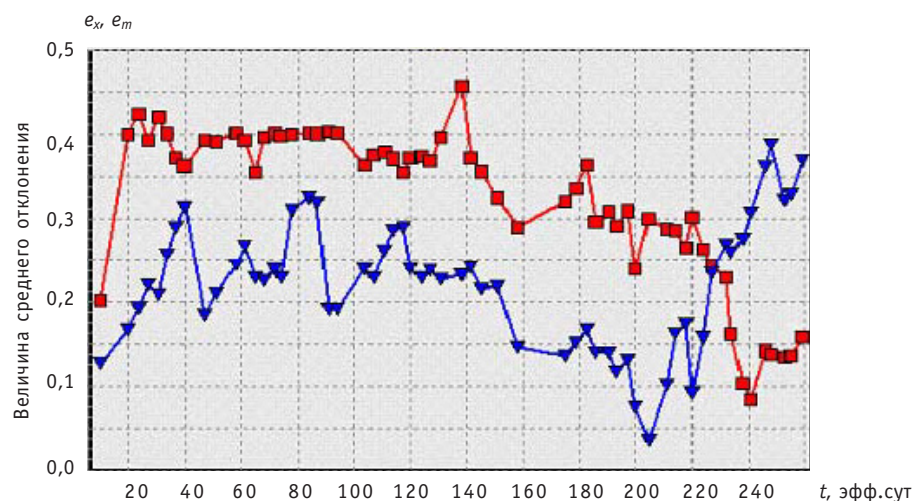


Рис. 8. Величина среднего отклонения от расчетов БИПР для различных видов ПО. Пятнадцатая орбита симметрии 1 блока КЛНАЭС: —■— ХМ; —▼— МПО

Рис. 9 демонстрирует момент нарушения работы ПО «Хортица», связанного с несоответствием коэффициентов физической модели реальному выгоранию топлива в активной зоне. Таким образом, методика позволяет заблаговременно определить момент наступления нарушения адекватного описания поля энерговыделения ПО СВРК и необходимость корректировки коэффициентов адаптации модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный подход к анализу показаний СВРК позволяет

- выявлять недостоверные показания измерительной системы СВРК, не обнаруженные системой;
- определять отклонения в состоянии активной зоны, обусловленные физическим процессом;
- оценивать работоспособность СВРК;

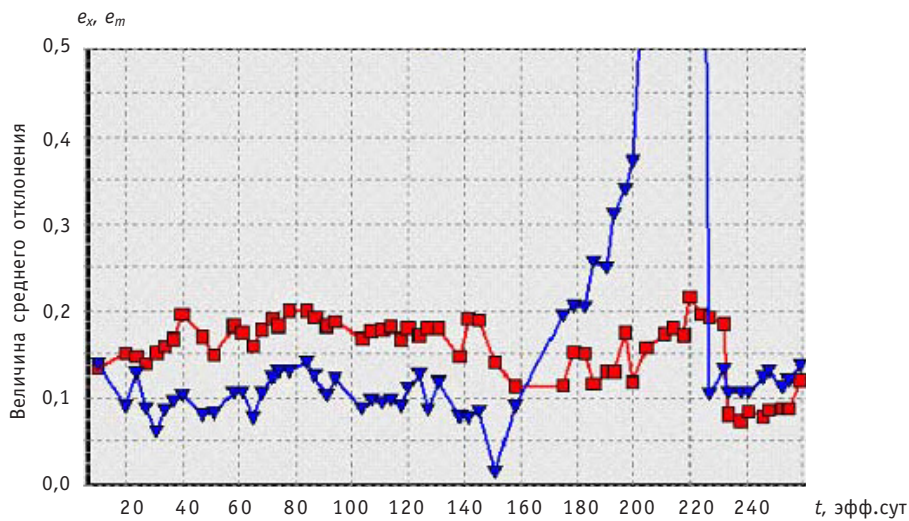


Рис. 9. Величина среднего отклонения от расчетов БИПР для различных видов ПО. Девятая орбита симметрии 1 блока КЛНАЭС: ■ — ХМ; ▴ — МПО

- выполнять сравнительный анализ различного ПО СВРК;
- оценивать необходимость корректировки коэффициентов физической модели ПО СВРК.

Дальнейшее развитие представленных алгоритмов – включение в анализ состояния активной зоны данных температурного контроля на выходе из ТВС.

Литература

1. Тудж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978.
2. Лескин С. Т. Статистическая модель диагностики активной зоны ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1996. – № 6. – С. 33–39.

Поступила в редакцию 6.06.2008

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.5

Method for Analysis of Serviceability of the Measuring System and Software for VVER-1000 In-Core Monitoring \ R.R. Alyev, S.T. Leskin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 9 pages, 9 illustrations. – References, 2 titles.

A method is presented which makes it possible to estimate the serviceability of the measuring system for in-core monitoring. The method also enables comparing the power density distribution of the VVER-1000 reactor core obtained with different software, as well as detecting unreliable readings of the power density detectors and identifying the core abnormal conditions. The method is used for analyzing in-core monitoring data at Kalinin NPP. Unreliable readings of the measuring system have been detected. Comparison of different versions of the in-core monitoring software has also been performed.

УДК 621.039.58

Analysis of Recent Human Reliability Analysis Methods at Nuclear Technologies \ Yu.V. Volkov, A.V. Sobolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages. – References, 11 titles.

In paper consider challenges of modern techniques for human reliability analysis. The fallacy of way to develop methods HRA towards expansions of a list considered performance shaping factors that influencing to personnel performance is shown. Questions of developing of databases on occurrences at the NPP to obtain, on the basis of analysis this information, parameters necessary for performance PRA are mentioned, and also recommendations to organization of such systems are given. Possible classification of operators or crew errors is presented.

УДК 621.039.5

Automated Geometric Characteristic Inspection System of Graphite EGP-6 Reactor \ A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.G. Kalenishin, A.V. Nahabov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 4 pages, 5 illustrations. – References, 1 title.

The paper presents the automated geometric characteristic inspection system of graphite EGP-6 reactor. System structure and sensor information handling algorithm are described.

УДК 628.31

Sorbition Properties of New Type Alumosilicate Adsorbent \ A.S. Shilina, V.K. Milunchuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 5 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.

The structure and sorbition properties of new type alumosilicate adsorbent was studied. The specific area of the surface sorbent is equal about 700 m²/g, the dimensions of sorbent particles is equal from 2 to 20 mkm, the filled density of the sorbent powder is equal 0.3 g/cm³. The sorbition capacity of the sorbent is equal by the cations (mg/g): calcium – 130, iron – 670, cobalt – 60, nickel – 100, lead – 40 and strontium – 300. The sorbition ability of sorbent keeps to 600°C.

УДК 621.039.524.5

Estimates of Lithium-6 and Helium-3 Nuclei Accumulation in Beryllium Blocks for the MIR Reactor Neutronic Analysis \ V.V. Kalygin, A.P. Malkov, V.V. Pimenov, A.B. Ovchinnikov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 5 illustrations. – References – 9 titles.

Neutron irradiation causes reactions in beryllium blocks of the MIR reactor core that leads to an accumulation of ³He and ⁶Li nuclei in them, which have a large thermal neutron capture cross-section. The accumulation of a neutron absorber in the reactor moderator leads to changes in the most important physical characteristics, i.e. reactivity margin, control rod worth, reactivity effects,