

УДК 621.039.5

ПРЕДИКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

© 2023 С.В. Тен^{1*}, А.М. Загребяев¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

*e-mail: tenstanislav@email.com

Поступила в редакцию: 01.06.2023

После доработки: 09.06.2023

Принята к публикации: 15.06.2023

В данной работе предлагается подход для точечного выявления неработоспособных датчиков на основе анализа диагностических параметров. Такими параметрами могут выступать коэффициенты «скользящей корреляции», четвертое собственное число и относительное отклонение восстановленного показания датчика. С помощью приведенных диагностических параметров можно изначально сразу определять ТВС, в которой один из ДПЗ предположительно вышел из строя, далее анализировать корреляции уровней между собой и с помощью восстановленного значения выносить окончательное суждение о работоспособности каждого высотного датчика.

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить экспресс-анализ архива реактора ВВЭР. Это имеет научно-практическую ценность в контексте повышения качества работы оперативного персонала и анализа ситуаций, требующих дополнительного внимания и более детального анализа. Применение данного подхода может помочь обнаружить неисправности в датчиках и принять своевременные меры для предотвращения возможных проблем и аварийных ситуаций, что является важным шагом в обеспечении безопасности и эффективности работы системы контроля и управления реактором ВВЭР.

Ключевые слова: ядерный реактор, датчик контроля, предиктивная диагностика, архив эксплуатационных параметров, анализ данных, статистика.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.243

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности и безопасности эксплуатации ядерных энергетических реакторов в настоящее время в значительной степени достигается за счет совершенствования математического обеспечения, в основе которого лежат математические модели нейтронно-физических процессов, протекающих в активной зоне реактора. В процессе эксплуатации, в силу воздействия большого количества случайных факторов (например, колебаний расхода теплоносителя, перемещения органов регулирования, флуктуации паросодержания и др.), нейтронно-физические свойства имеют случайный характер, что приводит к необходимости в ряде задач контроля и управления рассматривать реактор как объект со случайными параметрами [1].

Архив эксплуатационных параметров ядерного реактора, как и любые другие данные, обладает определенными статистическими характеристиками, анализируя которые, можно выносить

суждения о работе ядерного реактора. Нахождение закономерностей работы ядерного реактора может в большей степени способствовать увеличению эффективности работы объекта как с точки зрения работы операторов, так и проведения последующего анализа накопленных данных.

В практике эксплуатации ядерных реакторов нередки ситуации, когда часть внутриреакторных датчиков выходит из строя. Если датчик выходит из строя, то его показаниями пользоваться запрещено. Например, если выйдет из строя более чем одна секция датчика РБМК, то детектор считается «запрещенным». Канал нейтронных измерений ВВЭР запрещается при выходе из строя более двух датчиков [2].

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 % [3].

Характерной особенностью системы внутри-реакторного контроля (СВРК) является то, что ее функционирование влияет непосредственно как на безопасность, так и на экономичность эксплуатации энергоблока АЭС. В современной СВРК-М появилась функция по формированию сигналов предупредительной и аварийной защиты по внутриреакторным локальным параметрам энерговыделения. Кроме этого, именно в СВРК определяется средневзвешенная тепловая мощность реактора, которая влияет на расчет технико-экономических показателей работы энергоблока. В связи с вышеуказанным, необходимым условием эксплуатации становится своевременное диагностирование отказов информационно-измерительных каналов СВРК [4].

Таким образом, имея информацию о поведении параметров ядерного реактора в рамках нескольких кампаний, можно провести анализ статистических характеристик с целью выявления некоторых диагностических параметров, наблюдая которые, можно выносить суждения об аномальной или неправильной эксплуатации объекта. Такими параметрами для предиктивной диагностики могут выступать некоторые выявленные статистические величины, анализируя которые, можно выносить предположения о работе отдельных компонентов реактора.

Элементы контроля и защиты в ядерном реакторе, которыми, в том числе, являются датчики прямого заряда (ДПЗ), позволяют измерять поле энерговыделения в активной зоне, однако они имеют свойство утрачивать точность своих показаний со временем, или, другими словами, деградировать. Деградация датчиков приводит к снижению достоверности измеряемых значений и может привести к неверной эксплуатации, что, в свою очередь, может привести к аварии на объекте.

Таким образом, возникает необходимость в восстановлении утраченной измерительной информации с ДПЗ при помощи статистических алгоритмов восстановления показаний датчиков.

При этом, были проанализированы зависимости параметров и разработан систематический подход для предиктивной диагностики датчиков

контроля в ядерном реакторе с целью выявления неработоспособных.

ПОИСК ЗАВИСИМОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМЕЮЩЕГОСЯ АРХИВА

Для проведения анализа были использованы значения энерговыделения, снятые с помощью датчиков прямого заряда (ДПЗ), как наиболее подходящие для проведения предварительного анализа. Датчики расположены равномерно по всему объему активной зоны ЯР, что позволяет выявлять аномалии с помощью расположенных рядом «соседних» датчиков. Анализ проводился в разрезе одной кампании, продолжительность которой составляла около 6 мес.

Для нахождения некоторого диагностического параметра, с помощью которого можно было бы выносить суждения о работоспособности датчиков, необходимо найти зависимости значений параметров или корреляцию.

При условии выявления корреляции параметров между собой можно на основе статистических характеристик выявлять отклонения параметров от нормальных или предельно-допустимых значений.

К показаниям одного из датчиков по высоте было добавлено фиктивное возмущение для того, чтобы посмотреть, как поведут себя графики (рис. 1). Данное решение позволяет смоделировать ситуацию, когда датчик выходит из строя и, соответственно, показания датчика не являются истинными.

При последующем анализе была выбрана функция скользящей корреляции для значений ЭВ по ДПЗ между четвертым и пятым уровнем для одной конкретной кассеты. Период был выбран равным 60 дням, так как объем выборки позволяет выбрать наибольший интервал, позволяющий наглядно заметить явное отклонение значения корреляции.

Другими словами, понятие «скользящей корреляции» было введено как название функции, значение которой в каждой точке определения равно некоторому значению корреляции за предыдущий выделенный период. Так как при расчете значение функции вычисляется каждый раз заново, при этом учитывается конечное значение множество предыдущих значений, функция «перемещается» (движется), как бы «скользя» по временному ряду.

Из графика на рис. 2 можно сделать вывод, что при выходе датчика из строя значение корреляции уменьшается и стремится к нулю, что говорит о том, что значение функции скользящей

корреляции можно использовать как один из диагностических параметров для выявления выхода датчика из строя.

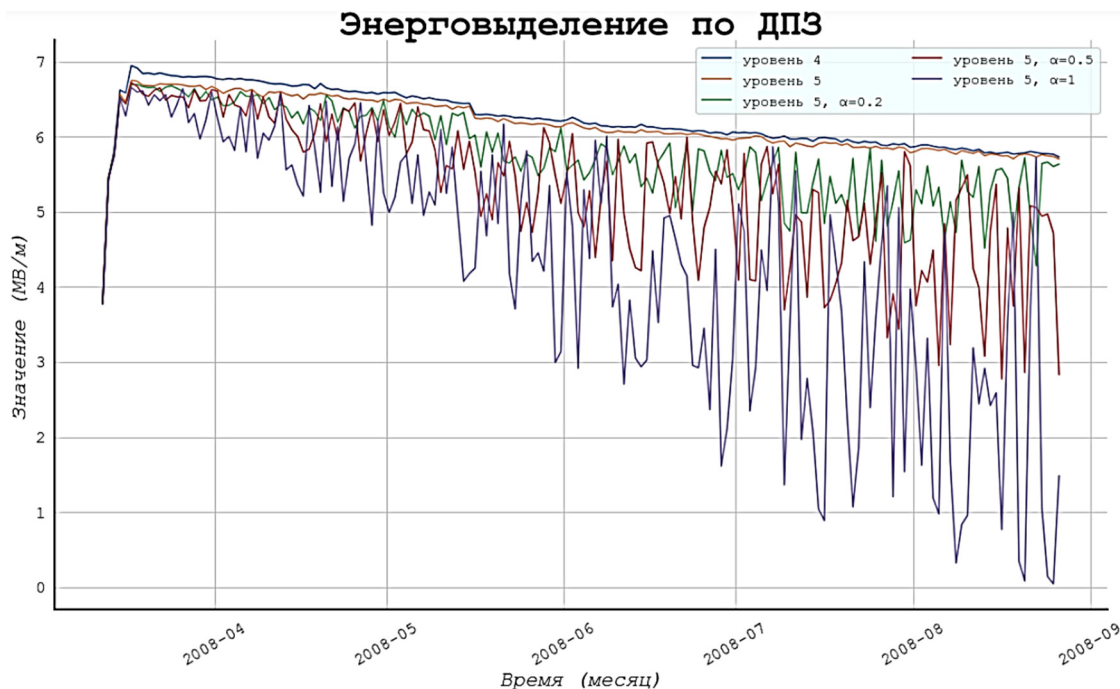


Рис. 1. График значения ЭВ по ДПЗ по времени с добавленным фиктивным возмущением

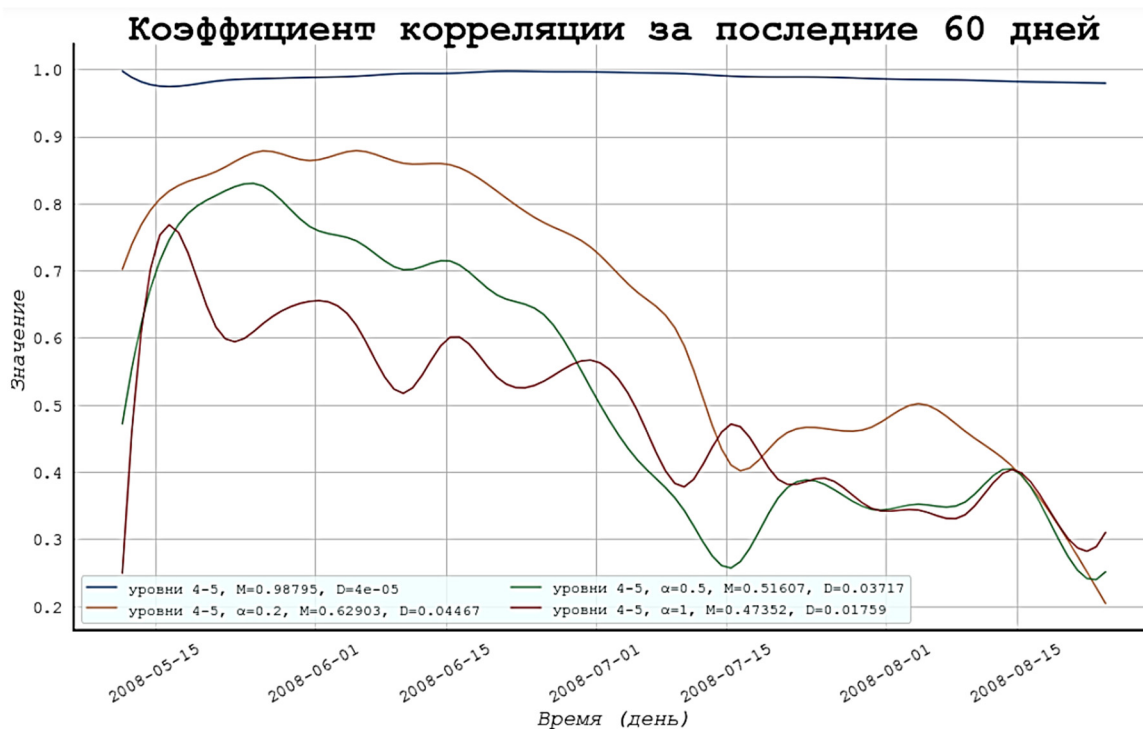


Рис. 2. Графики функции скользящей корреляции значений с добавленным фиктивным возмущением

Также был построен график (рис. 3) отклонения функции скользящей корреляции относительно эталона. Эталонными значениями было решено считать истинные значения ЭВ по ДПЗ (без внесения фиктивных возмущений). При этом было выполнено сглаживание графика получен-

ных экспериментальных данных с целью упрощения восприятия визуализации, так как итоговые значения функции скользящей корреляции сильно восприимчивы к случайному возмущению истинных значений.

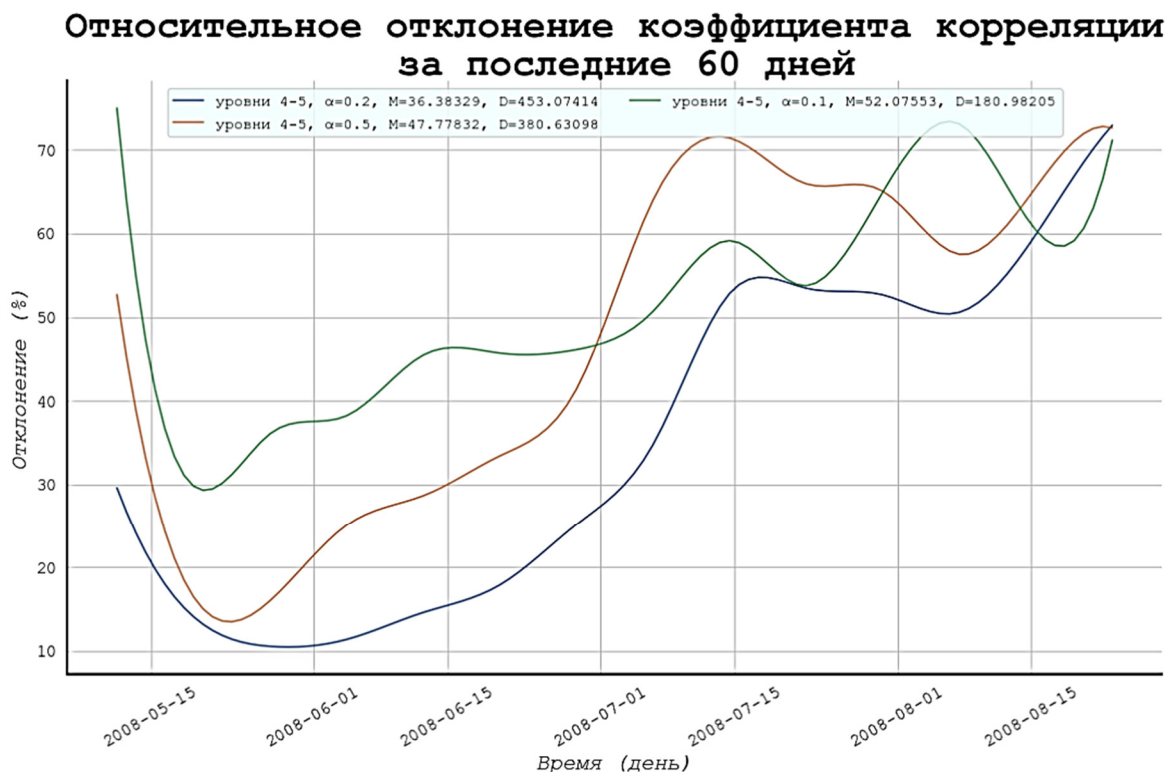


Рис. 3. График отклонения функции скользящей корреляции относительно эталона (исходных значений)

На графике также можно наблюдать рост корреляции вплоть до 100 % с увеличением разброса случайной ошибки со временем. Таким образом, можно сделать вывод, что с ростом величины ошибки возрастает отклонение значения корреляции.

ПОИСК И АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ МАТРИЦЫ КОРРЕЛЯЦИИ

Для исходных данных была посчитана матрица значений функции скользящей корреляции всех уровней между собой для одной кассеты, имеющей в себе ДПЗ. Таким образом, для каждого момента времени была получена квадратная матрица 7x7, в которой номер строки или столбца – это номер датчика по высоте, а на пересечении – расчетное значение функции скользящей

корреляции за последние 60 дней. На главной диагонали значения равны 1, так как на ней приведены значения корреляции ряда с самим собой. При этом матрица получилась симметричная относительно главной диагонали, так как значение корреляции однозначны для двух уровней вне зависимости от порядка. Данные свойства сохраняются для каждой рассчитанной матрицы для любого момента времени. Пример полученной матрицы для одного временного среза приведен на рис. 4.

Далее, аналогично предыдущим экспериментам, к истинным значениям ЭВ по ДПЗ было добавлено фиктивное случайное возмущение, начиная с 31 дня, с целью выявления закономерностей изменения собственных значений и моделирования ситуации выхода одного из датчиков из строя. Результаты приведены на рис. 5, а-в.

```

[[ 1.      -0.4122 -0.6732 -0.7766 -0.8377 -0.8751 -0.1852]
 [-0.4122  1.      0.9472  0.8787  0.8043  0.686  -0.4267]
 [-0.6732  0.9472  1.      0.9844  0.9493  0.8722 -0.2344]
 [-0.7766  0.8787  0.9844  1.      0.9888  0.9394 -0.0995]
 [-0.8377  0.8043  0.9493  0.9888  1.      0.9779  0.0323]
 [-0.8751  0.686  0.8722  0.9394  0.9779  1.      0.2258]
 [-0.1852 -0.4267 -0.2344 -0.0995  0.0323  0.2258  1.      ]]

```

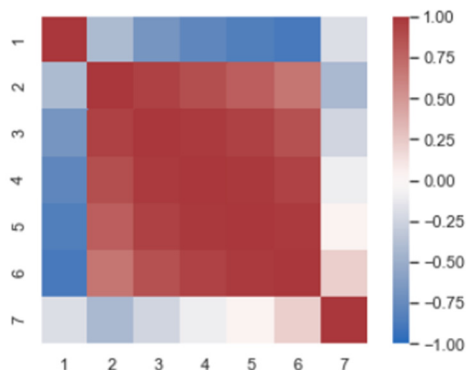


Рис. 4. Матрица значений функции скользящей корреляции

Из графиков можно сделать вывод, что, когда к истинным значениям добавляется фиктивное возмущение, т.е. моделируется ситуация выхода датчика из строя, значение четвертого собственного числа резко возрастает и принимает постоянное ненулевое значение. Таким образом, значение четвертого собственного числа можно использовать как еще один более общий диагностический параметр для выявления выхода из строя одного из высотных датчиков в определенной касете. При визуализации значения данного параметра на картограмме активной зоны предоставляется возможность идентифицировать касету, в которой наблюдается отклонение значений одного из датчиков, и, проанализировав другие, более точные, характеристики (например, диагностический параметр в виде отклонения корреляции), выявить, какой именно высотный датчик вышел из строя.

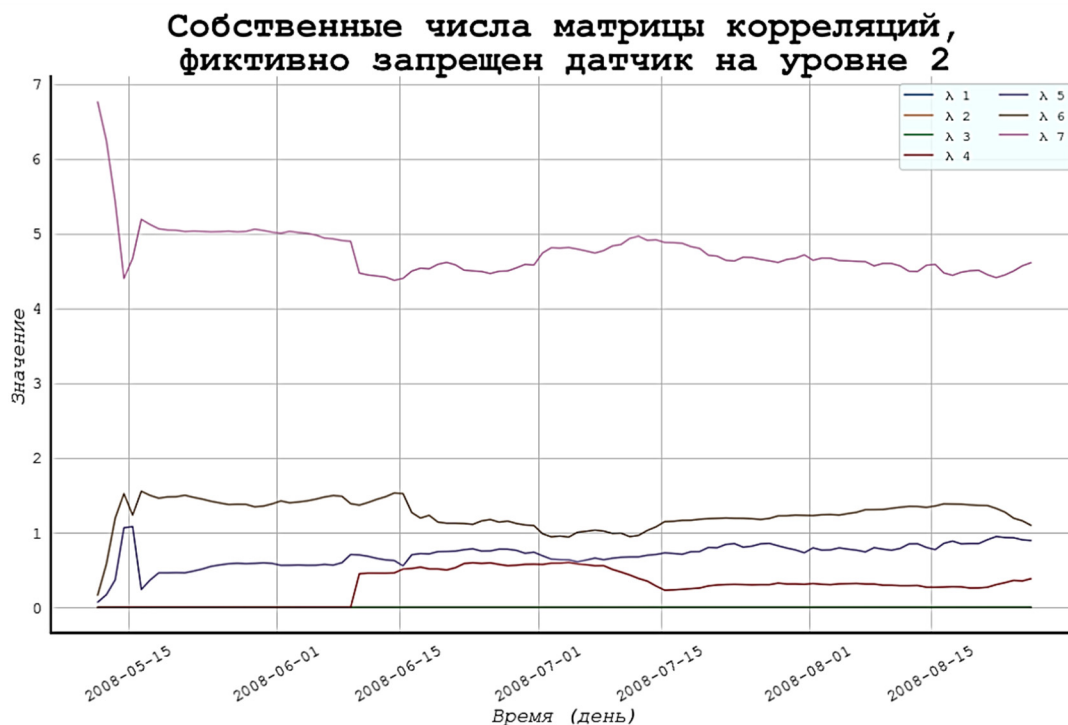


Рис. 5, а. График зависимости собственных значений от времени (запрещен датчик на уровне 2)

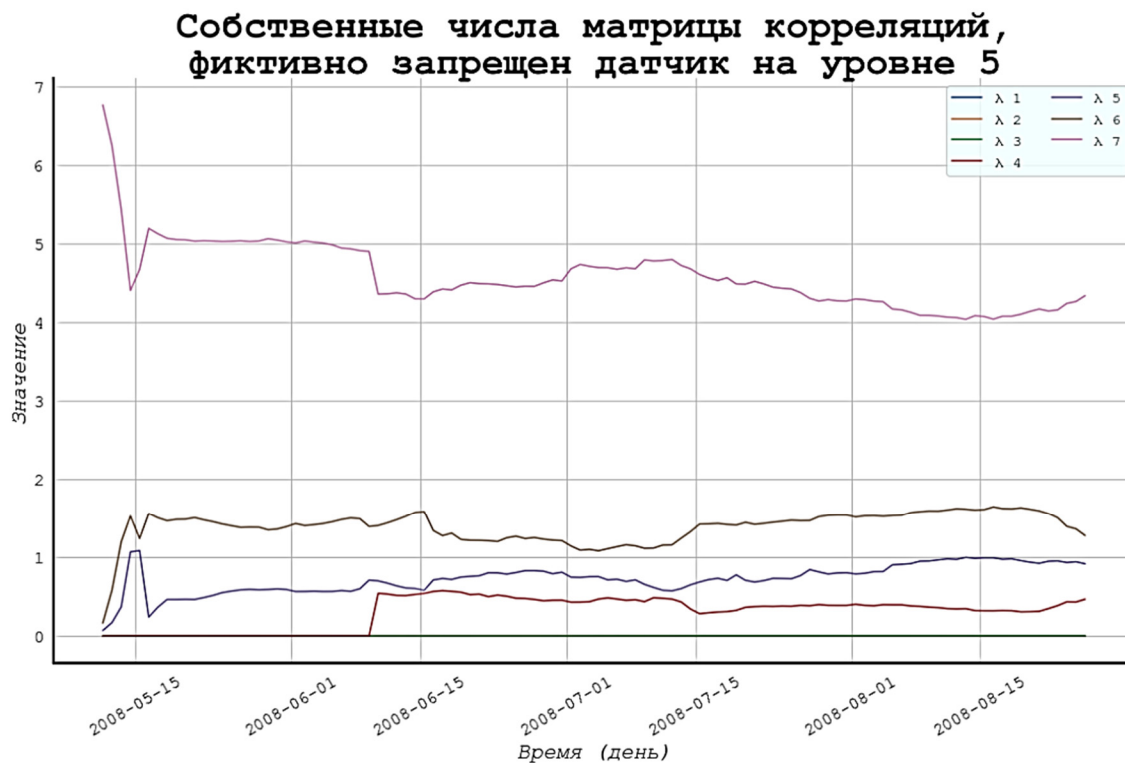


Рис. 5, б. График зависимости собственных значений от времени (запрещен датчик на уровне 5)

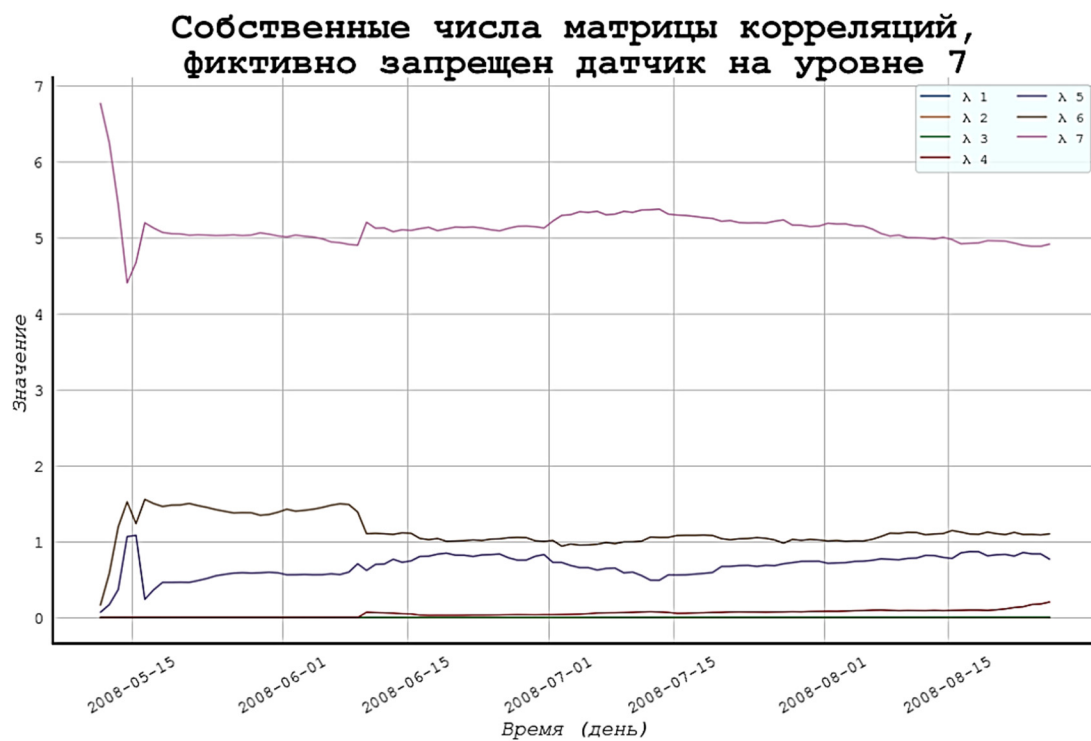


Рис. 5, в. График зависимости собственных значений от времени (запрещен датчик на уровне 7)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ УТРАЧЕННОГО ПОКАЗАНИЯ ДАТЧИКА И АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОШИБКИ

Уменьшение числа показаний датчиков внутриреакторного контроля, на основе которых восстанавливается энерговыделение в активной зоне реактора, приводит к возрастанию погрешности его определения и требует модификации штатного алгоритма восстановления.

Утраченную измерительную информацию можно восстановить математическими методами и тем самым избежать преждевременной замены вышедших из строя детекторов, что целесообразно и с экономической точки зрения. Для этого утраченные показания предлагается рассчитать путем аппроксимации по известным точкам, при этом пробные функции определяются на основе накопленной архивной информации [2].

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОКАЗАНИЯ ДАТЧИКА

Простейший алгоритм, приведенный в работе [2], основан на том, что распределение плотности потока нейтронов, например, по высоте аппроксимируется с помощью собственных функций «голового» одномерного реактора с однородной загрузкой без обратных связей:

$$\varphi(x) \approx \sum_{j=1}^n A_j \psi_j(x), \quad (1)$$

где $\psi_j(x) = \sin\left(\frac{j\pi x}{H}\right)$ – собственные функции реактора, $x \in [0; H]$; H – высота активной зоны реактора; n – число собственных функций; A_j – коэффициенты аппроксимации.

Коэффициенты аппроксимации A_j находятся по методу наименьших квадратов из условия:

$$J = \min_{A_j} \sum_{i=1}^m (C_i - \sum_{j=1}^n A_j \psi_j(x_i))^2, \quad (2)$$

где m – число работоспособных датчиков; C_i – показания работоспособных датчиков.

Утраченное измерение C_i в месте расположения «запрещенного» датчика x_i определяется из выражения:

$$C_i = \sum_{j=1}^n A_j \psi_j(x_i). \quad (3)$$

Очевидно, что число функций разложения в представлении (1) должно быть не больше числа работоспособных датчиков ($n \leq m$). Например, если отказали три датчика из семи в одном КНИ,

то для восстановления поля по остальным датчикам можно привлекать не более четырех гармонических функций $\psi_j(x) = \sin\left(\frac{j\pi x}{H}\right)$, $j = 1 \dots 4$.

Однако реальное распределение поля нейтронов может не описываться суперпозицией именно этих функций. Действительно, в реальной эксплуатации в силу множества причин (обратные нейтронно-физические и теплофизические связи, перемещение органов регулирования и др.) распределение размножающих свойств меняется во времени и пространстве и не является однородным.

Предлагается на основе архивной информации о поведении полей нейтронов в процессе эксплуатации синтезировать такие функции аппроксимации $\tilde{\psi}_i(x)$, которые меньшим количеством описывали бы распределение ППН в реакторе. Тогда возможно было бы по показаниям работоспособных датчиков восстановить информацию в местах расположения запрещенных ДПЗ или секций ДКЭВ.

Координатные функции канонического разложения являются аналогом собственных функций работающего реактора. При этом математическое ожидание плотности потока нейтронов – функция $\tilde{\psi}_0(x)$ – аналог фундаментального решения, т.е. собственной функции, отвечающей наименьшему собственному значению, функции $\psi_1, \dots, \psi_n$ соответственно отвечают большим собственным значениям. Их предложено называть «естественными функциями реактора». Видимо, по этой физической причине ряд из координатных функций канонического разложения сходится быстрее, чем при других функциях аппроксимации. Упомянутые выше функции канонического разложения показаны на рис. 6.

В ВВЭР канал нейтронных измерений состоит из семи ДПЗ, поэтому естественные функции определяются по семи точкам. Это позволяет использовать большее их число для восстановления утраченных показаний. Выход из строя двух и даже более датчиков не вносит сильную погрешность при использовании предложенной методики.

При частичной потере измерительной информации для восстановления высотного распределения плотности потока нейтронов предпочтительнее использовать естественные функции (функции приближенного канонического разложения). Такой выбор базиса позволяет восстанавли-

ливать поле меньшим числом функций с меньшей на порядок ошибкой восстановления, чем при наборе гармонических функций. Эффект снижения ошибки достигается потому, что при построении нового базиса используется информация о возможном высотном распределении плотности потока нейтронов в процессе эксплуатации реактора. Более того, на примере решения данной задачи, по сути, предложен подход к контролю энерговыделения, заключающийся в том, что алгоритм контроля адаптируется в процессе работы реактора.

Далее, так же, как и в прошлых экспериментах, к показаниям одного из датчиков было добавлено фиктивное возмущение в виде линейно возрастающей ошибки, т.е. была смоделирована ситуация выхода датчика из строя.

После этого были «запрещены» три датчика с одного края, и аналогичным образом, применяя коэффициенты смещения и каноническое разложение функции распределения, показания были восстановлены. График истинных показаний предположительно вышедшего из строя датчика и его восстановленных по алгоритму значений приведен на рис. 7.

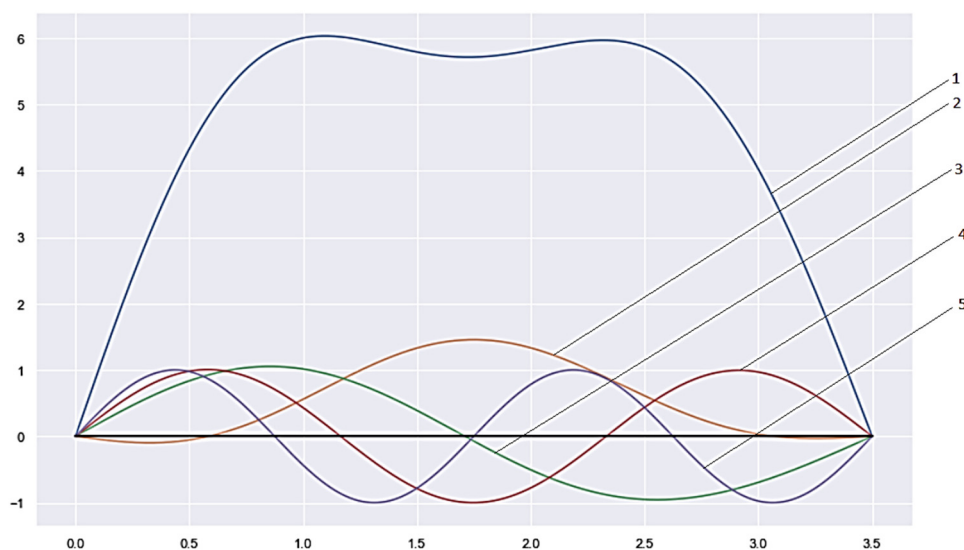


Рис. 6. Функции приближенного канонического разложения (1 — математическое ожидание, 2, 3, 4, 5 — соответствующие функции) в ВВЭР



Рис. 7. Восстановленные показания вышедшего из строя датчика

Анализируя график относительной погрешности восстановления, можно заметить, что значение для датчика, к которому было добавлено фиктивное возмущение, резко возрастает, вплоть до 50 %, и явно превышает ошибку восстановления показаний остальных датчиков (рис. 8). Таким образом, анализируя данное представление, можно сделать предположение, что датчик на

определенном уровне вышел из строя, и дальнейшая его эксплуатация является ошибочной.

Приведенным выше методом был выявлен еще один индикатор, который можно использовать в качестве дополнительного диагностического параметра для предиктивной диагностики датчиков контроля в ядерном реакторе.

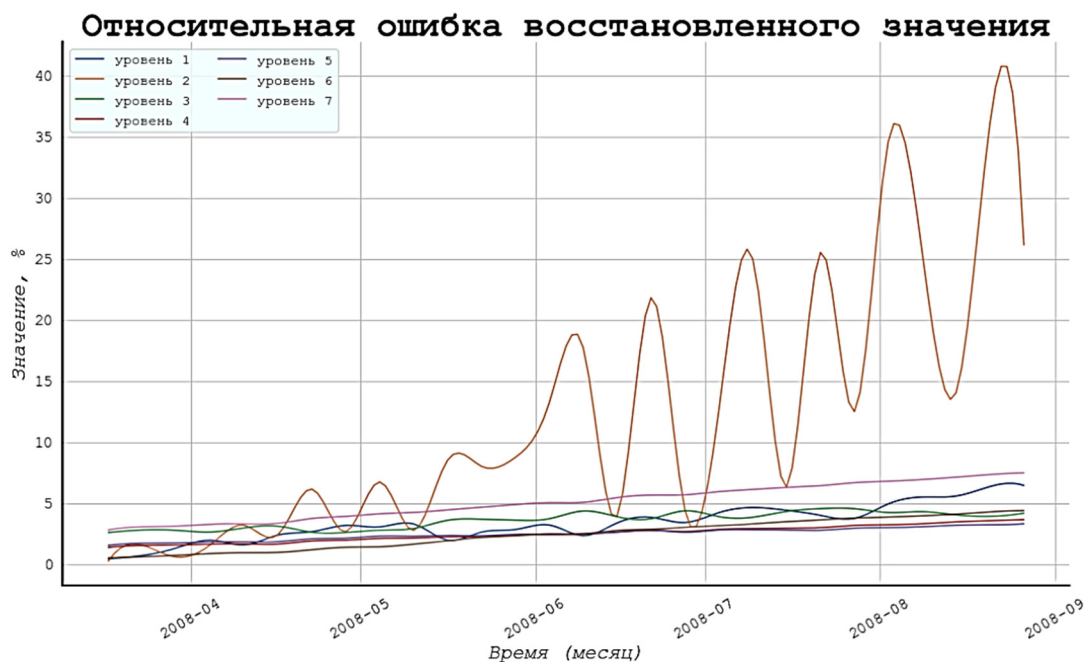


Рис. 8. График относительной ошибки восстановленных показаний ДПЗ (добавлено фиктивное возмущение к одному из уровней, запрещены три датчика с одного конца)

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНЫХ ДПЗ

Таким образом, применяя разработанные выше методики и выявленные диагностические параметры, предлагается подход по определению предположительно вышедших из строя датчиков контроля на основе следующего алгоритма.

На первом этапе предлагается при получении данных за новый временной срез рассчитывать собственные числа матрицы корреляций и визуализировать четвертое значение на картограмме активной зоны. Таким образом, датчики, в которых значения собственного числа будут отличны от нуля, предположительно имеют в сборке неработоспособный датчик.

Для проверки предположения, сделанного на первом этапе алгоритма, предлагается рассчиты-

вать функцию скользящей корреляции. Таким образом, можно выявить, корреляции показаний каких именно датчиков начинают снижаться во времени, и предположить, что какой-либо из зафиксированных датчиков вышел из строя.

На финальном этапе «запрещаются» датчики, корреляции которых снижаются, и значения утраченных показаний восстанавливаются приведенным выше методом. В случае, если относительное отклонение истинных и восстановленных показаний превышает допустимое, датчик отбраковывается и далее считается вышедшим из строя.

Таким образом, с помощью приведенной методики можно достаточно точно выявлять неработоспособные датчики во всех топливных сборках активной зоны реактора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подход, предложенный в данной работе, позволяет структурированно, отталкиваясь от общей картограммы активной зоны ядерного реактора, получить наглядные индикаторы, сигнализирующие об отклонениях нормальной эксплуатации. В среднем ошибка восстановления при запрете до трех датчиков с одного края ТВС составляет до 10 %, что говорит о том, что с помощью выявленных диагностических параметров можно достаточно точно предположить, какой именно из высотных датчиков предоставляет неверные значения.

Данный подход может использоваться оперативным персоналом с целью выявления вышедших из строя датчиков, так как оперативное реагирование на возможную деградацию может снизить или предотвратить риск неверной эксплуатации объекта и избежать аварийных ситуаций. При этом подход также может использоваться для проведения последующего анализа накопленных архивов эксплуатационных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загребаев А.М., Насонова В.А., Овсянникова Н.В. Математическое моделирование ядерного ре-

актора при случайных возмущениях технологических параметров. М.: НИЯУ МИФИ. 2011.

2. Загребаев А.М., Овсянникова Н.В., Рамазанов Р.Н., Мильто Н.В. Восстановление утраченного показания высотного датчика контроля за полем нейтронов по данным архива // Атомная энергия, 2015. Т. 118. № 3. С. 129–133.

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

4. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В., Мусихин А.М. Построение системы диагностики состояния информационно-измерительных каналов СВРК АЭС с ВВЭР в режиме реального времени // IX Международная научно-техническая конференция «Безопасность, экономика и эффективность атомной энергетики». Тезисы докладов. Москва. Концерн «Росэнергоатом», 2014. С. 90.

5. Загребаев А.М., Рамазанов Р.Н. Визуализация архива параметров ядерного энергоблока с реактором РБМК // Научная визуализация, 2015. Т. 7. № 2. С. 1–11.

6. Загребаев А.М., Овсянникова Н.В. Автоматизированная обучающая система по физике реакторов. М.: МИФИ, 2002.

7. Косоуров К.Б., Калинушкин А.Е., Мильто В.А., Мильто Н.В. Методика отбраковки ДПЗ для 1 и 2 энергоблоков АЭС «Тяньвань» НИЦ «Курчатовский институт», 2012. Инв. № 32/1-31-112 от 20.02.2012.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 2, pp. 103–113

PREDICTIVE DIAGNOSTICS OF CONTROL SENSORS IN A NUCLEAR REACTOR

S.V. Ten¹, A.M.¹ Zagrebayev*

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

**e-mail: tenstanislav@email.com*

Received June 1, 2023; revised June 9, 2023; accepted June 15, 2023

In this paper, we propose an approach for the pinpoint detection of inoperable sensors based on the analysis of diagnostic parameters. Such parameters can be the "sliding correlation" coefficients, the fourth eigenvalue and the relative deviation of the reconstructed sensor reading. With the help of the above diagnostic parameters, it is possible to immediately determine the fuel assembly in which one of the DPZ is presumably out of order, then analyze the level correlations between each other and, using the restored value, make a final judgment on the performance of each altitude sensor.

The developed software makes it possible to carry out an express analysis of the archive of the VVER reactor. This has scientific and practical value in the context of improving the quality of work of operational personnel and analyzing situations that require additional attention and more detailed analysis. The application of this approach can help detect

malfunctions in sensors and take timely measures to prevent possible problems and emergencies, which is an important step in ensuring the safety and efficiency of the VVER reactor monitoring and control system.

Keywords: nuclear reactor, control sensor, predictive diagnostics, operating parameters archive, data analysis, statistics.

REFERENCES

1. Zagrebaev A.M., Nasonova V.A., Ovsyannikova N.V. Matematicheskoe modelirovanie yadernogo reaktora pri sluchajnyh vozmushcheniyah tekhnologicheskikh parametrov [Mathematical modeling of a nuclear reactor with random perturbations of technological parameters]. M.: NIYAU MIFI Publ., 2011.
2. Zagrebaev A.M., Ovsyannikova N.V., Ramazanov R.N., Mil'to N.V. Vosstanovlenie utrachennogo pokazaniya vysotnogo datchika kontrolya za polem nejtronov po dannym arhiva [Restoration of the Lost Readings of the Altitude Neutron Field Monitoring Sensor Based on Archive Data]. Atomnaya energiya, 2015. Vol. 118. No. 3. Pp. 129–133 (in Russian).
3. Alyev P.P., Leskin S.T. Metod analiza rabotosposobnosti izmeritel'noj sistemy i programmnogo obespecheniya vnutrireaktornogo kontrolya VVER-1000 [Method for analyzing the performance of the measuring system and software for in-reactor monitoring of VVER-1000]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika, 2008. No. 3. Pp. 4–12 (in Russian).
4. Saunin YU.V., Dobrotvorskij A.N., Semehin A.V., Musihin A.M. [Construction of a system for diagnosing the state of information-measuring channels of the SVRK NPP with VVER in real time]. Devyataya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Bezopasnost', ekonomika i effektivnost' atomnoj energetiki». Tezisy dokladov. Moskva. Koncern «Rosenergoatom» [Ninth International Scientific and Technical Conference «Safety, Economics and Efficiency of Nuclear Power». Abstracts of reports. Moscow. Concern «Rosenergoatom»], 2014. Pp. 90 (in Russian).
5. Zagrebaev A.M., Ramazanov R.N. Vizualizaciya arhiva parametrov yadernogo energobloka s reaktorom RBMK [Visualization of the parameters archive of a nuclear power unit with an RBMK reactor]. Nauchnaya vizualizaciya, 2015. Vol. 7. No. 2. Pp. 1–11 (in Russian).
6. Zagrebaev A.M., Ovsyannikova N.V. Avtomatizirovannaya obuchayushchaya sistema po fizike reaktorov [Automated teaching system for reactor physics]. M.: NIYAU MIFI Publ., 2002.
7. Kosourov K.B., Kalinushkin A.E., Mil'to V.A., Mil'to N.V. [DPZ rejection technique for power units 1 and 2 of Tianwan NPP]. NIC «Kurchatovskij institut» [NRC «Kurchatov Institute»], 2012. Inv. No. 32/1-31-112 from 20.02.2012.