

P13-2006-49

В. Н. Мельников, Ю. Н. Пепельшев, А. С. Чистозвонов*

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА
ПРИ АНАЛИЗЕ НАРУШЕНИЙ В РАБОТЕ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Направлено в журнал «Атомная энергия»

* ЦМТО, Ростехнадзор, Москва

Мельников В. Н., Пепельшев Ю. Н., Чистозвонов А. С. P13-2006-49
Применение вероятностного метода при анализе нарушений в работе
исследовательских ядерных установок

Предложена вероятностная и частотная модель анализа нарушений в работе исследовательских ядерных реакторов на основе опыта эксплуатации реактора ИБР-2. Модель позволяет прогнозировать и оценивать вероятность и частоту появления отклонений от нормальной работы реактора, а также вероятность проектных аварий.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Melnikov V. N., Pepelyshev Yu. N., Chistozvonov A. S. P13-2006-49
Application of the Probability Method to Analysis of Operation Failures
of Nuclear Research Facilities

The probability and frequency model is suggested for analyzing the operation failures of nuclear research reactors on the basis of the experience of operating the IBR-2 reactor. The model allows one to predict and estimate the probability and frequency of the divergences from the normal reactor operation, as well as the probability of project breakdowns.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Создание условий, обеспечивающих надежную и безопасную эксплуатацию ядерных установок (ЯУ), в том числе и исследовательских ядерных установок (ИЯУ), относится к одной из наиболее важных задач, решаемых в процессе проектирования ЯУ. Большой интерес представляет знание оценки вероятности возникновения нарушения в работе ИЯУ, полученной на основе анализа эксплуатации ИЯУ. Это позволяет более точно прогнозировать и оценивать последствия проектных аварий. Для этой цели разрабатываются единые критерии оценки состояния ЯУ. Например, в практику введен унифицированный анализ возникающих в работе исследовательских ядерных установок нарушений, а также классификация нарушений [1, 2]. Получить количественную оценку вероятности возникновения тех или иных нарушений, исходя из анализа работы ЯУ, — задача очень сложная, противоречивая и недостаточно определенная [3]. Однако ввиду большой социальной значимости проблем, поднимаемых при ее рассмотрении, необходимо использовать все имеющиеся возможности для решения этой задачи. В работе сделана попытка исследовать все нарушения, имевшие место при эксплуатации импульсного ядерного реактора ИБР-2 (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна), и на основе имеющихся данных оценить вероятность появления более серьезных нарушений или даже аварий. Кроме того, в дополнение к уточненным данным по вероятности возникновения нарушений в работе использован частотный анализ, что позволяет более точно прогнозировать время появления тех или иных нарушений.

1. МОДЕЛЬ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ АНАЛИЗА ОТКАЗОВ В РАБОТЕ ИЯУ ИБР-2

За основу модели вероятностного подхода к анализу нарушений в работе ИЯУ взяты данные по нарушениям, имеющим место в процессе работы установки ИБР-2. Для статистического анализа были использованы все нарушения, начиная с 1984, т. е. с момента пуска реактора в эксплуатацию, и по 2005 г. Частота появления нарушений в зависимости от времени работы ИБР-2 по годам представлена на рис. 1. Данные нормированы на реальное время работы реактора в году.

Следует отметить, что возникновение нарушений в работе ИЯУ любого типа, а не только ИБР-2 реально, как и для всякого сложного технического объекта. Установка проектируется с учетом возможных отказов: отказы не должны влиять на безопасность ее эксплуатации. Конкретные причины отказов и их связь с тем или иным видом оборудования в данной работе не рассматриваются. Учитывается только сам факт отказа, сопровождающийся остановкой работы ИЯУ.

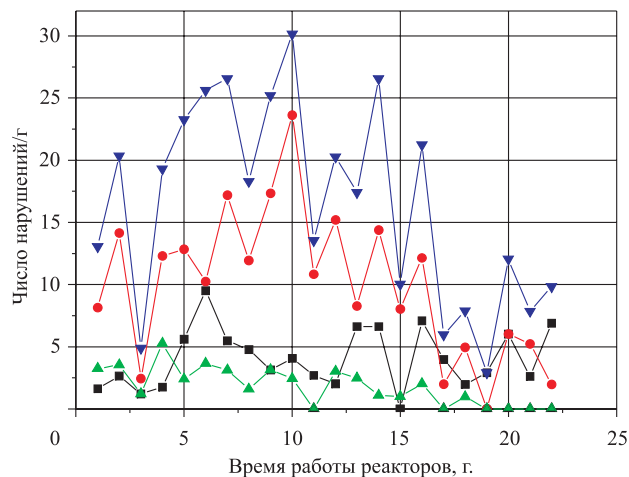


Рис. 1. Частота появления нарушений в работе ИБР-2 в зависимости от времени работы установки ИБР-2: ▼ — все события; ● — П2; ▲ — П3; ■ — П1

Для классификации нарушений в работе реактора ИБР-2 принимались во внимание шкала классификации по НП-027-01 [2] и шкала INES [4]. На основе указанных выше шкал классификации условно выделим следующие категории событий:

П0 — нарушения в работе, не имеющие значения для безопасности;

П1 — отключение напряжения во внешней электросети без превышения пределов безопасной эксплуатации;

П2 — нарушения в работе систем управления без отклонения рабочих параметров и отказов оборудования ИЯУ;

П3 — ошибки персонала, нет отклонений от нормальной эксплуатации;

П4 — нарушения в работе технологического оборудования, важного для безопасности, отклонение от нормальной эксплуатации;

П5 — возникновение аварийной ситуации в результате неработоспособности каналов систем безопасности в количестве, исчерпывающем их резерв, или в результате нарушения в работе технологического оборудования, важного для безопасности;

П6 — аварийные ситуации, связанные с повреждением технологического оборудования, важного для безопасности, или отказами в работе реактора и требующие сложных ремонтных работ;

П7 — аварии, связанные с повреждением ТВЭЛов, превышающим пределы безопасной эксплуатации;

П8 — аварии, связанные с нарушением пределов безопасной эксплуатации и выходом радиоактивных продуктов в пределах установки;

П9 — аварии, связанные с риском для окружающей среды, значительные повреждения активной зоны, выброс радиоактивных продуктов за пределы ИЯУ не велик.

Отличие данной классификации от рекомендованной, например, в работе [2] незначительно: сделана поправка на конкретные особенности установки ИБР-2. Имеющаяся статистика нарушений в работе ИБР-2 охватывает категории от нулевой до четвертой. Относительная частота этих событий приведена в табл. 1.

Таблица 1. Относительная частота событий отказов ИЯУ ИБР-2 по категориям

Категория события	П0	П1	П2	П3	П4
Относительная частота	0,00262	0,249	0,602	0,115	0,0314

2. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВ В РАБОТЕ ИБР-2

Из имеющегося фактического материала ничего нельзя сказать о возможности появления событий с категорией выше четвертой. Для того чтобы на этом этапе анализа можно было использовать вероятностные подходы к обработке данных, введем дополнительные условия, которым должны удовлетворять категории событий:

— нарушения располагаются в порядке предполагаемого роста тяжести последствий;

— распределение вероятности отказов по категориям должно иметь, по возможности, один максимум;

— события слева от максимума происходят по внешним причинам или не связаны непосредственно с тяжестью последствий;

— события справа от максимума являются следствием нарушений в работе ИЯУ, что характеризует ИЯУ как систему безопасности в целом;

— появление события с высоким номером носит случайный характер и описывается спадающей экспоненциальной функцией.

Последнее условие можно обосновать исходя из общего положения, что события с высокими номерами равновозможны и редки, т. е. поток событий стационарен, ординарен и не имеет последствий. Обозначая средний интервал между поступившими событиями через ζ и функцию распределения вероятностей случайной величины x через $F(x)$, следуя [7], можно написать дифференциальное уравнение 1-го порядка для $F(x)$ в виде

$$dF(x)/dx = (1 - F(x))/\zeta.$$

Решая это уравнение, получаем искомое распределение вероятностей в виде

$$F(x) = 1 - c \exp(-x/\zeta).$$

Постоянную интегрирования определяют по значению $F(x)$ в нуле. В нашем случае это невозможно, поскольку решение имеет смысл только для больших значений аргумента x и не определено в нуле, однако в этом нет необходимости. Дифференцируя $F(x)$, переходим к выражению для плотности распределения вероятностей событий в виде спадающей экспоненциальной функции

$$y(x) = a \exp(-x/\zeta). \quad (1)$$

Постоянная a и величина ζ определяются из относительной частоты событий в точках П3 и П4. Аргумент x принимает дискретные целые значения, далее в тексте равные n , и соответствует шкале событий П3–П9. То есть предполагается, что асимптотическое поведение плотности вероятности событий в экспоненциальной форме (1) начинается с точки П5. Получаем

$$y(n) = 5,678 \exp(-1,299n), \quad n \geq 5. \quad (2)$$

На основании сделанных выше предположений можно не только определить вероятность появления тех событий, которые уже произошли, но и оценить вероятность появления событий, которые на ИБР-2 еще не происходили. В частности, можно оценить вероятность нарушений в важных для анализа категориях П5 и П6 и выше. Результаты расчетов по формуле (2) после нормировки на единицу представлены в табл. 2 и для наглядности на рис. 2.

Таблица 2. Расчетные оценки плотности вероятности отказов ИБР-2 с интерполяцией на случай очень редких отказов (вплоть до П9)

Категория события	П0	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9
Вероятность события	0,0026	0,246	0,60	0,114	0,031	8,5e-3	2,31e-3	6,3e-4	1,72e-4	4,68e-5
Центр распределения $\xi = 1,964$; дисперсия $\sigma^2 = 0,6303$; $\sigma = 0,794$										

Как видно из табл. 2, вероятности событий П5 и П6 достаточно велики. Например, для события П5 следует, что пара подобных событий уже должна быть зарегистрирована на ИБР-2.

Выражение для вероятности события (2) можно распространить и на n , равное 10. По изложенной выше классификации событий и в соответствии с международной шкалой INES событие П10 можно отнести к «тяжелой» аварии на реакторе. Имеется общее требование к вероятности появления «тяжелых» аварий на ИЯУ, заключающееся в том, что вероятность таких аварий

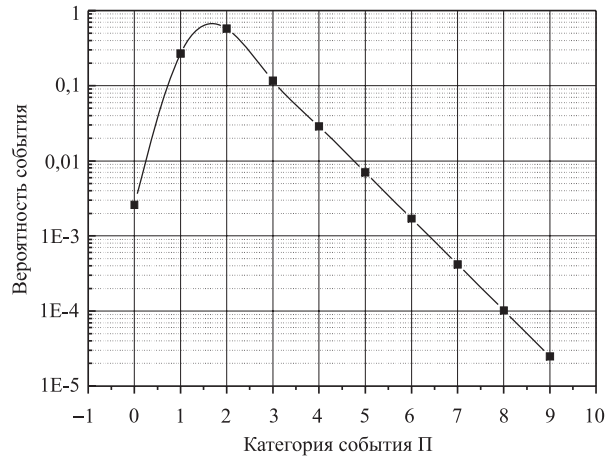


Рис. 2. Плотность вероятности событий отказов ИБР-2 по категориям отказов

не должна превышать 10^{-6} в год. Для реактора ИБР-2 такая авария относится к разряду «гипотетических» и поэтому в качестве возможной проектной аварии не рассматривается. Формальное вычисление для ИБР-2 вероятности события П10 по формуле (2) для $n = 10$ дает значение, равное $1,28 \cdot 10^{-5}$ в год. Если учесть диапазон ошибок в точках сшивки функции (1), который пропорционален корню квадратному из числа событий в каждой наблюдаемой точке, то полученное значение вероятности в точке 10, в общем, соответствует вероятности данной аварии, заложенной в проекте ИБР-2, хотя несколько и превышает проектное значение. Проектные оценки вероятности подобных аварий основывались на расчете надежности и вероятности отказов отдельных элементов оборудования. От расчета надежности отдельных элементов переходили к расчету надежности всей системы в целом. Такой подход не совсем верен, поскольку ИБР-2 относится к категории так называемых «сложных» объектов. Методологически понятие «сложный объект» заключается в том, что такой объект не может быть полностью описан на основе имеющихся знаний о поведении отдельных его составляющих. В данной работе оценка вероятности отказов для $n > 4$ проводилась на основе реальных данных по отказам для $n \leq 4$, имеющим место в процессе эксплуатации ИБР-2. Эти отказы в обобщенном виде уже содержат в себе реальные коэффициенты надежности элементов оборудования, которые могут и не совпадать с принятыми в проекте значениями. Тем не менее, расчеты, проведенные по изложенной методике, согласуются с данными по надежности установки, заложенными в проекте.

Проведем оценку сверху вероятности появления отказа категории П5 и выше. Для этого рассмотрим вероятность того, что абсолютное отклонение

случайной величины от ее центра распределения превзойдет данное число. Воспользуемся неравенством Чебышева [5]:

$$P\{|x - \xi| \geq n\} \leq \sigma^2/n^2. \quad (3)$$

Для дисперсии, равной 0,6303 (см. табл. 2.), при n , равных 3 и 4, $P\{|x - \xi| \geq 3\} \leq 0,07$, $P\{|x - \xi| \geq 4\} \leq 0,039$. Вероятность того, что очередное событие будет удалено на три единицы от категории П2, т.е. произойдет событие типа П5 или выше, меньше или равна 0,07. Здесь нужно отметить, что вероятность отклонения случайной величины от среднего значения слабо зависит от диапазона ошибок в точках сшивки функции (1), в то время как значения плотности вероятности в этих точках могут отличаться в 2–3 раза. Дисперсия слабо зависит от асимптотического поведения плотности вероятностей отказов ввиду их незначительного вклада в величину дисперсии. Таким образом, максимальная вероятность появления события П5 получается достаточно большой, и такое событие за время эксплуатации ИБР-2 (22 года) должно уже было реализоваться, однако в официальной статистике подобных отказов нет. Аналогичная проблема наблюдается и в статистике отказов в работе оборудования при эксплуатации АЭС [6]. Авторы анализа по отказам оборудования на АЭС утверждают, что «проблематично иметь достоверную информацию о сравнительно редких отказах 10^{-2} – 10^{-4} в год» из-за «тех действий и корректировок, которые предпринимаются по результатам отказов и нарушений». В нашем случае, как следует из табл. 2, вероятности событий П5 и П6 попадают в этот интервал.

Как показывает практика, если нарушение в работе установки штатным образом обрабатывает система управления и защиты, т.е. осуществляется просто остановка работы ЯУ без последствий, то у эксплуатирующей организации появляется желание понизить категорию события, используя возможности, имеющиеся в нормативной документации при субъективной трактовке возникшего нарушения. С другой стороны, события с вероятностью порядка 10^{-4} уже влияют на проект ИЯУ из-за требований по безопасности, что влечет за собой необходимость проведения компенсирующих мероприятий. Однако если событие еще не произошло или не было официально зарегистрировано, то проведение компенсирующих мероприятий в качестве упреждающей меры очень затруднительно. Это связано с большими техническими трудностями (неясно, что необходимо делать) и большими материальными затратами.

3. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ИБР-2

Для исследования периодичности в появлении тех или иных категорий отказов используем классический спектральный анализ временных рядов на

основе быстрого преобразования Фурье. После обычных процедур, предваряющих получение спектральных оценок (удаление среднего, детренд и т. д.), для указанного на рис. 1 четырехкомпонентного временного ряда получены оценки периодичности возникновения отказов в виде спектральной плотности мощности. Результаты представлены на рис. 3.

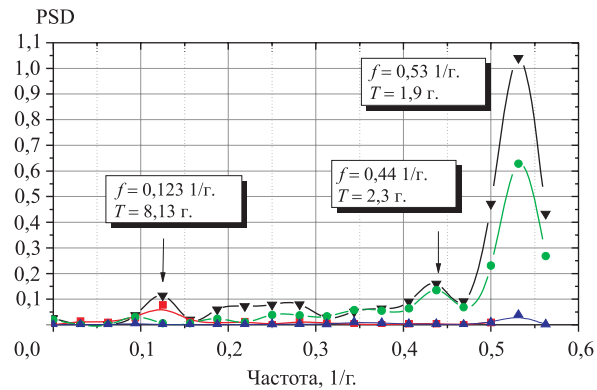


Рис. 3. Спектральная плотность колебаний событий: ▼ — все события; ● — П2; ▲ — П3; ■ — П1

Из рис. 3 видно, что основная частота появления всех отказов наблюдается с периодом, равным 1,9 г., и практически полностью обусловлена отказами по категориям П2 и П3, т. е. нарушениями в работе систем управления без отклонения рабочих параметров и отказов оборудования ИЯУ и ошибками персонала, без отклонений от нормальной эксплуатации. Дополнительно отказы по категории П2 с гораздо меньшей интенсивностью происходят и с периодом 2,3 г. Существенная доля отказов по категории П1, как видно из рис. 3, следует с периодом 8,13 г. Эти отказы связаны с отключением напряжения во внешней электросети без превышения пределов безопасной эксплуатации. Нужно отметить, что значительная часть всех отказов, приблизительно 35%, происходит «бессистемно», т. е. по статистической терминологии является «белым» шумом. С другой стороны, появление отдельных категорий отказов ИБР-2, таких как П1, П2 и даже П3, более чем на 50 % детерминировано и предсказуемо. Установить причину такой периодичности отказов ИБР-2 в данном исследовании было невозможно. Нужно отметить, что статистической оценкой элемента временного ряда отказов было взято число отказов за год, поэтому основной период отказов, равный 1,9–2,0 лет, есть лишь оценка минимально наблюдаемого периода. Более детальная частотная картина отказов, например, анализ отказов по месяцам или по кварталам работы реактора в данном случае не имеет надежной статистической точности.

4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Из анализа нарушений, проведенного на основе фактических данных по отказам во время эксплуатации реактора ИБР-2, следует, что вероятностный и спектральный анализ нарушений по категориям отказов дает важную информацию, необходимую для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации реактора.

Отмечается, что полученные в работе оценки вероятности появления событий, связанных с отказом оборудования и аварий с тяжелыми последствиями, согласуются с проектными требованиями к установке, хотя и несколько превышают их. Необходимо отметить, что оценки этого превышения зависят от выбора аппроксимирующей функции распределения вероятностей на асимптотике. В частности, например, для распределения Эрланга порядка больше единицы [7] в случае, если события отказов могут приходиться по два и более, отмеченные превышения над проектными значениями уже могут отсутствовать. В данной работе использован самый простой тип распределения Эрланга порядка единицы — экспоненциальный.

В заключение авторы благодарят руководство реактора ИБР-2 за оказанную помощь при работе с данными по нарушениям и отказам на установке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. НП-033-01. М., 2001.
2. Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе исследовательских ядерных установок. НП-027-01. Вестник Госатомнадзора России №2, 2001.
3. Митенков Ф. М., Авербах Б. А. Вероятностный анализ безопасности ЯЭУ, его роль и место в практике проектирования // АЭ. 1992. Т. 72, вып. 4. С. 337.
4. Букринский А. М., Федулов В. Ф. Международная шкала оценки опасности событий на АЭС // АЭ. 1991. Т. 70, вып. 1. С. 3.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1974.
6. Ковалевич О. М., Веземский В. Г. Безопасность АЭС и прочность элементов оборудования при продлении срока эксплуатации блоков первого поколения // АЭ. 2001. Т. 90, вып. 2. С. 90.
7. Купер Дж., Макгилле К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. М.: Мир, 1989.

Получено 7 апреля 2006 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 10.07.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 305 экз. Заказ № 55405.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/