

**Методология и программное обеспечение, используемое
для разработки базы данных для ВАБ, и их практическое
применение для действующих АЭС с реакторами типа ВВЭР**

А. Глуценко, В. Морозов, Г. Токмачев

*Ежегодная конференция молодых специалистов ФГУП ОКБ «Гидропресс»,
Подольск, Московская обл., 19 – 20 января 2006 г.*

Введение

ФГУП "Атомэнергопроект" является ведущим предприятием в России, осуществляющим комплекс проектных, научно-исследовательских, проектно-конструкторских и изыскательских работ и инженерно-консультационных услуг по выбору площадок, строительству, монтажу, пуско-наладке и освоению проектных мощностей атомных станций с различными типами энергетических реакторных установок. За годы существования предприятие, образованное на базе подразделений «Атомтеплоэлектропроекта», разработало проекты 112 энергетических блоков ТЭС и АС общей мощностью более 80 тысяч МВт.

Одним из важных направлений деятельности предприятия являются вероятностные анализы безопасности (ВАБ) и надежности АС. Результаты ВАБ используются во ФГУП "Атомэнергопроект" в качестве инструмента для выработки и принятия решений по повышению безопасности при проектировании АС нового поколения и для решения эксплуатационных вопросов действующих АС с ВВЭР (реконструкция, модернизация, продление срока службы).

За последнее время во ФГУП «Атомэнергопроект» были выполнены ВАБ уровня 1 для энергоблоков действующих и вновь проектируемых АС с реакторами ВВЭР, включая:

- ВАБ уровня 1 для энергоблоков с реактором В-320 Балаковской АС. Отчеты по ВАБ были включены в состав проектных материалов, представленных концерном «Росэнергоатом» в Госатомнадзор РФ для получения лицензии на ввод энергоблока 4 в эксплуатацию и для получения лицензий на продолжение эксплуатации блоков 1-4 [1]. Результаты ВАБ были также использованы для повышения коэффициента использования установленной мощности энергоблоков, в частности, были обоснованы внесения изменений в технологический регламент в части периодичности испытаний и выводов в ремонт оборудования систем безопасности и проведения капитальных ремонтов систем безопасности;
- ВАБ уровня 1 для энергоблоков 3 и 4 с реакторами ВВЭР-440 Нововоронежской АЭС, разработанные по проектам 1.4 и R.01/96 Программ ТАСИС-91 и ТАСИС-96, соответственно, и по проекту НОВИСА. Результаты ВАБ, которые прошли экспертизу Госатомнадзора РФ, были использованы для разработки мер по модернизации с целью повышения уровня безопасности этих энергоблоков и для получения лицензии Госатомнадзора РФ на продление срока службы этих энергоблоков еще на 5 лет[2,3];
- ВАБ уровней 1 и 2 для внутренних исходных событий, ВАБ для пожаров в помещениях АС и ВАБ для сейсмических воздействий в составе проекта достройки АС «Бушер» в Исламской Республике Иран с реактором ВВЭР-1000 (РУ В-446). ВАБ уровня 1 был подвергнут экспертизе миссии МАГАТЭ и Иранского надзорного органа и использован Иранской эксплуатирующей организацией для получения лицензии на строительство АС «Бушер»;
- на основе результатов ВАБ для АС с РУ В-320 были определены слабые места этого проекта и сформулированы основные принципиальные решения по повышению безопасности, которые вошли в концепцию безопасности проектов энергоблоков АС третьего поколения (проект АС-92) [4]. Применение этой концепции позволило создать энергоблок с качественно новым уровнем безопасности с одновременным снижением затрат на его сооружение и эксплуатацию. Основные решения по проекту АС-92 реализованы в проектах второй очереди Нововоронежской АС (НВАЭС-2) и в проекте АС «Куданкулам» в Республике Индии. ВАБ для этих проектов использованы Индийской эксплуатирующей организацией и Росэнергоатомом для получения лицензий на сооружение.

Получение результатов ВАБ, адекватно отражающих свойства анализируемой АС, возможно только при корректном решении задачи сбора и обработки исходных данных. ФГУП "Атомэнергопроект" занимается этой проблематикой более 16 лет. За это время накоплен опыт сбора и обработки данных по надежности оборудования для целей ВАБ, используя различные подходы: целенаправленный сбор данных на конкретной АС (Балаковская, Нововоронежская, Калининская, Кольская, Запорожская АС), сбор данных через национальные или международные информационные системы, получение данных от заводов-изготовителей, испытывающих выпускаемое оборудование. Во ФГУП «Атомэнергопроект» имеется также опыт разработки отраслевых и международных документов по сбору и обработке данных по надежности для целей ВАБ, а также соответствующих стандартов предприятия.

В докладе изложены подходы к получению оценок показателей надёжности элементов АС и обсуждены проблемы, требующие решения.

1. ПРОБЛЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО НАДЕЖНОСТИ

Некоторые методические вопросы обработки данных выходят за рамки классической теории и требуют принятия определённой системы подходов и допущений, более относящихся к сфере инженерного анализа. В частности, к таким вопросам относятся задачи определения объекта сбора и анализа данных, интерпретации эксплуатационной информации в терминах одной из классических схем наблюдения, просеивание данных, не отвечающих критериям отказов, учёт цензурирования, учёт необходимости объединения потенциально неоднородной информации и т.д. Таким образом, несмотря на наличие обширной литературы по методам математической статистики, практическое использование известных теоретических разработок может вызвать значительные трудности.

Ниже приводится обзор наиболее характерных проблем в области подготовки данных, которые потребовали разработки специальных подходов:

- В классической теории математической статистики проблема определения объекта – источника для формирования выборочных данных не рассматривается. На практике, модель ВАБ всегда апеллирует к т.н. групповым параметрам, характеризующим надёжность однотипных элементов, в предположении полной идентичности их параметров в пределах рассматриваемой группы. При этом, чем представительнее группа, тем больший совокупный объём данных доступен для анализа. Однако, формирование больших групп элементов почти всегда приводит к невыполнению указанного выше допущения, т.е. потере однородности объединяемых данных. Необходимо отметить, что выполнение ВАБ при проектировании новой АС имеет свою специфику, связанную с необходимостью объединения информации от разных АЭС с одинаковым типом реактора, что также приводит к анализу неоднородных выборок.
- Необходимо спроецировать массив собранных событий на границы элементов, определенных в вероятностной модели. Это не простая задача, так как регистрация данных о событиях, относящихся к одному элементу в терминах ВАБ, может осуществляться разными цехами АС. Например, выключатель обычно входит в состав насоса, но его отказы часто регистрируются не в реакторном/турбинном цехе, а в электроцехе.
- При разработке моделей ВАБ отказы элементов подразделяются на несколько видов в зависимости от режимов работы элементов, характера и способа обнаружения, их тяжести и т.д. Отдельные виды отказов могут моделироваться в ВАБ разными первичными событиями. Таким образом, необходимо классифицировать полученные в процессе сбора информации события для того, чтобы полученные статистические оценки соответствовали параметрам, использованным в вероятностной модели. Классификация очень сильно влияет на получаемые оценки. Проблема часто усугубляется неясными и очень краткими описаниями событий в эксплуатационной и ремонтной документации. Помимо указанного, отдельная обработка информации по различным видам отказов связана с необходимостью многократного цензурирования исходной выборки.
- В тех случаях, когда информация об отказах базируется на результатах испытаний, важным вопросом является адекватность условий испытаний оборудования условиям работы при авариях. Возможными причинами неадекватности данных и модели для разных элементов могут быть:

- Частичные испытания, когда не все узлы элемента нагружены или находятся в работе.
- Краткосрочность испытаний – например, насос подкачки топлива дизель-генератора не работает при краткосрочном испытании.
- Испытания в менее нагруженном режиме, например, испытания по программе ступенчатого пуска с работой насосов на рециркуляцию, испытание БРУ-А без реверса, открытие задвижек после предварительного страгивания.
- Испытание насосов по неадекватной гидравлической схеме.
- Иногда имеет место эффект виртуального улучшения результатов испытаний, связанный с тщательной проверкой оборудования перед испытаниями или пропуском информации об имевших место промежуточных действиях или событиях, например, «подрывах» задвижек вручную перед открытием от электропривода, игнорированием первого неудачного пуска, если второй – успешный..
- Необходимо распределить реальные отказы, выявленные во время испытаний между отказами на запуск или отказ при работе. Обычно в российских ВАБ отказы насосов, дизель-генераторов и вентиляторов, выявленные в течение 30 минут после запуска классифицируются как отказ на запуск. Реально этот отказ возникает в режиме ожидания, но проявляется с некоторым запозданием.

2. МЕТОДОЛОГИЯ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, РАЗРАБОТАННОЕ ВО ФГУП «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ» ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ НАДЁЖНОСТИ

2.1 Общие положения

До настоящего времени при получении количественных оценок показателей надёжности элементов применялись различные и большей частью упрощённые расчётные методики, не позволяющие использовать системный подход к статистическому анализу имеющейся информации, начиная со стадии её первичной обработки.

Основными недостатками указанных выше методик являются:

1. Игнорирование важности стадии первичной обработки, отсутствие рекомендаций по проверке полноты и однородности данных, формированию групп однородных в статистическом отношении объектов наблюдения, отсутствие рекомендаций по статистически обоснованному определению периодов наблюдения, для которых выполняется оценивание.
2. Отсутствие рекомендаций по выбору типовых задач статистического оценивания для характерных ситуаций, встречающихся на практике, рекомендаций по составлению соответствующих выборочных рядов.
3. Игнорирование цензурированных выборок, исключительное применение методов классической статистики, основанной на полных выборках.
4. Постулирование определённых законов распределения наработок до отказа и длительностей периодов восстановлений, в частности, экспоненциального закона.

Как следствие применения упрощённых методик, модели и характеристики, используемые для представления изменения состояния элементов во времени, оказываются не адекватными реальности, что в конечном итоге может привести к ошибочным заключениям об уровне безопасности и надёжности АЭС в целом.

В качестве иллюстрации к сказанному можно привести такой пример. Известно, что при проведении расчётов показателей надёжности часто постулируется экспоненциальный закон наработок до отказа и времён восстановления элементов. В качестве обоснования принятия этой гипотезы без статистической проверки приводится ссылка на тот факт, что использование экспоненциального закона при расчёте характеристик надёжности основных видов структур резервированных систем приводит по сравнению с другими законами с тем же значением математического среднего (в предположении принадлежности их к классу «немолодеющих» распределений) к консервативным оценкам в запас надёжности. С учётом данного обстоятельства, обработка статистической информации об отказах элементов сразу проводится в предположении справедливости экспоненциального закона. Проблема состоит в том, что для эксплуатационных данных, получаемых по цензурированным выборкам, реализующим другие законы распределения, оценки интенсивностей отказов или средних наработок на отказ при априорном принятии экспоненциального закона могут быть существенно оптимистическими.

Таким образом, задача разработки методической базы решения задач в области статистического анализа данных эксплуатации элементов АЭС на основе системного подхода должна включать:

- обобщение существующих подходов и задач классической статистики, пригодных для учёта специфических условий эксплуатации оборудования АЭС и особенностей систем сбора информации;
- разработку общей идеологии анализа данных, начиная со стадии первичной обработки эксплуатационной информации и кончая получением требуемых количественных оценок;
- разработку дополнительных методов статистической обработки данных, обеспечивающих совместно с применяемыми ранее подходами решение всей совокупности задач, вытекающих из общей идеологии анализа данных;
- практическую реализацию вновь предложенных и прежде применяемых методик в виде расчётных программ.

Ниже приводится описание общей методологии статистического анализа данных и применяемого математического аппарата.

Данный математический аппарат представляет собой комплекс расчётных методов и соответствующее программное обеспечение, которое используется для решения следующих задач количественной статистической обработки данных:

- оценок параметров распределений случайных величин, характеризующих наработку оборудования АЭС (далее элементов) до отказа или предельного состояния;
- проверки соответствия распределения наработок до отказа или предельного состояния стандартным теоретическим законам;
- восстановления исходной функции распределения наработок на основе применения непараметрических методов;
- получения оценок параметров для объединённых выборок, составленных путём объединения информации из нескольких источников
- выполнения аналогичных процедур обработки данных по временам восстановлений элементов после отказов.

2.2 Предварительная подготовка информации

Первичная обработка эксплуатационной информации, полученной из базы данных, в соответствии с разработанным подходом выполняется в несколько этапов, целью которых является анализ имеющейся в базе данных информации и её приведение к виду, необходимому для её последующей статистической обработки..

На первом этапе пользователь устанавливает тип и характеристики схемы наблюдения, т.е. определяет параметры, имеющие отношение к объекту сбора данных, условиям эксплуатации или испытаний элементов и граничным условиям, определяющим продолжительность, начало и окончание наблюдения (испытаний).

Важным параметром, подлежащим уточнению для любой из рассматриваемых схем является объём группы элементов, по которым производится поиск в базе данных и для которых постулируется неизменность всех параметров, определяющих свойство надёжности. Наиболее часто в качестве объекта для указанного поиска выбирается группа из N одинаковых по типу и конструкции элементов в составе одной системы АЭС, выполняющих идентичные функции и эксплуатирующихся в одинаковом режиме при сходных условиях внешней среды. Однако, для высоконадёжного оборудования часто бывает невозможно получить представительную статистику отказов для указанной (как правило, небольшой) группы элементов. В этом случае следует либо увеличить период наблюдения (что не всегда возможно) либо увеличить размерность группы оборудования, для которой выполняется сбор информации или производится запрос в базе данных. В последнем случае при последующей обработке статистической информации необходимо учитывать потенциальную неоднородность данных.

После идентификации схемы наблюдения и установления соответствующих ей параметров на втором этапе из всей совокупности записей, характеризующих нарушения в работе рассматриваемого оборудования отбираются события, удовлетворяющие определённым критериям отказов в рамках заранее заданных (и скоординированных с моделью ВАБ) границ элементов.

2.3 Определение границ компонентов

Как правило, оборудование, рассматриваемое в ВАБ в качестве элементов модели, содержит большое число составных частей и, следовательно, при проведении анализа должно рассматриваться в определённых границах. Типовые границы для некоторых типов элементов, моделируемых в ВАБ, представлены ниже.

Дизель-генератор

Включает дизельную и генераторную установки. Обеспечивающие системы указанных установок, такие как системы топлива, смазки, пуска, охлаждения и вентиляции, возбуждения, сжатого воздуха, а также система ступенчатого нагружения могут рассматриваться отдельно или совместно с дизельгенератором.

Насос с электроприводом

Включает механическую часть, двигатель, пускатель, соединительную муфту, выключатель, системы уплотнения и смазки, систему охлаждения, собственную систему контроля и автоматики.

Арматура с электроприводом

Включает механическую часть, двигатель, редуктор, электрическую сборку, систему контроля и индикации положения.

Предохранительный клапан

Включает главный клапан, импульсные клапаны, отключающий клапан, питающую сборку, систему контроля и индикации положения

Арматура с пневмоприводом

Включает механическую часть, пневмопривод, систему подачи сжатого воздуха, питающую сборку, систему контроля и индикации положения.

Теплообменник, бак и гидроёмкость

Границы компонентов определяются по фланцам трубопроводов.

Элементы системы электроснабжения, отличные от дизель генератора

Отдельно моделируемый выключатель включает исполнительную часть, привод, систему питания привода, изоляцию, систему контроля выключателя. Для остальных элементов физическими границами являются выходные контакты.

2.4 Определение видов неисправностей элементов

Основные виды отказов механических элементов представлены ниже в таблице 2.4-1

Классификация отказов механических элементов систем безопасности дана в отношении как критических так и некритических отказов. Эта классификация может варьироваться в зависимости от конкретных условий. Приведённые ниже примеры служат в основном для иллюстрации применяемого подхода.

Критический отказ означает событие, при котором основная рассматриваемая функция компонента теряется полностью в момент времени, при котором требуется его работа.

Некритический отказ означает событие, при котором значения отдельных параметров, характеризующих работоспособность элемента могут не соответствовать ТУ, однако он сохраняет способность выполнять предписанную ему основную функцию в течение ограниченного периода времени, при котором требуется его работа.

Для работающих компонентов отказ приводит к их немедленному выводу из рабочего состояния в ремонт, что иногда вызывает снижение мощности или останов блока. Для компонентов, находящихся в режиме дежурства, отказ можно обнаружить только при проведении испытания компонента или при поступлении требования на выполнение функции.

Кроме информации по отказам эксплуатационные данные как правило, содержат информацию по повреждениям элементов

Повреждение означает событие, при котором компонент способен выполнить предписанную ему функцию, однако значения некоторых параметров, характеризующих его работоспособность могут быть приближены к максимальным значениям, а определённые свойства, которые не являются определяющими для выполнения функций элемента могут быть частично утрачены. Данный вид отказа не требует немедленного ремонта. Более того, в ряде случаев ремонт может быть отложен на длительное время до плановой остановки блока.

Таблица 2.4-1

	Критические отказы	Некритические отказы
Насосы	Отказ на запуск Отказ на перезапуск Отказ при работе	Внешняя течь Шум, вибрация
Запорная арматура	Отказ на открытие/закрытие Отказ на повторное открытие/закрытие Ложное изменение положения Внутренняя течь	Отказ контроля и индикации Внешняя течь
Регуляторы	Отказ на открытие Ложное изменение Отказ по функции регулирования	Отказ контроля и индикации Внешняя течь
Обратные клапаны	Отказ на открытие/закрытие Внутренняя течь	Отказ контроля и индикации Внешняя течь
Предохранительные или паросбросные клапаны	Ложное открытие Отказ на открытие Отказ на закрытие после открытия Внутренняя течь	Отказ контроля и индикации Внешняя течь
Поглощающие стержни и приводы	Ложное введение стержня Отказ на ввод стержня	Внешняя течь
Heat exchangers	Большая течь	Незначительная течь, засорение, завоздушивание
Баки	Большая течь	Незначительная течь

Следует отметить, что классификация отказов компонентов должна соответствовать требованиям, обусловленным структурой деревьев отказов. Для элементов, которые характеризуются множеством различных видов отказов, но повторяются в различных деревьях в виде первичных событий, отвечающих одним и тем же функциональным последствиям, возможно использование обобщённого вида отказов-отказа на выполнение функции. Этот обобщённый вид отказа может включать различные частные виды отказов элементов, перечисленные выше.

Классификация типов отказов элементов должна учитывать также особенности систем безопасности, связанные с режимами их функционирования и техническим обслуживанием.

Так как системы безопасности выполняют заданные функции при возникновении исходных событий аварий, являющихся редкими событиями, то для них характерны два режима работы:

- режим ожидания, при котором системы должны находиться в состоянии готовности на случай возникновения ИС;
- режим непосредственного выполнения заданных функций в течение определенного времени после возникновения ИС.

В общем случае классификация видов отказов должна учитывать также специфическое влияние каждого вида отказов на работоспособность систем АЭС, а также условия их обнаружения и восстановления работоспособности.

2.5 Формирование выборочных данных

Общая совокупность полученных данных анализируется с целью выполнения классификации событий по критериям, приведённым выше. События, классифицированные как повреждения элементов, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Выполняется анализ первичных событий в модели ВАБ с целью определения возможности объединения при обработке событий, отвечающих различным видам отказов.

Для каждого события – отказа определённого вида (видов) фиксируются моменты наступления отказов и восстановлений оборудования. Для указанных схем существует единая форма представления результатов наблюдений, которая состоит из двух строчных массивов Γ и \mathcal{T} , в которых число строк равно N , а длины строк n_i являются случайными величинами, представляющими наблюдаемые количества отказов элементов на i -й позиции. В массивы Γ и \mathcal{T} записываются соответственно, моменты наступления отказов t_{ij} и восстановлений τ_{ij} , причем для элементов массивов должны выполняться неравенства $t_{ij} < \tau_{ij}$ и $\tau_{ini} < T_{\text{кон}}$, где $T_{\text{кон}}$ – момент окончания периода наблюдения.

На заключительном этапе первичной обработки информации данные, представленные в формате, описанном выше, преобразуются в выборочные ряды.

При анализе характеристик безотказности результаты наблюдения преобразуются в строки чисел, отвечающим наработкам до отказа x_{ij} и до цензурирования y_{ij} .

При этом, ввиду того, что в некоторых случаях ремонты или замены элементов не обусловлены отказами рассматриваемого вида, (они могут быть связаны с другими отказами или обусловлены иными причинами, например, планового характера), число цензурированных может быть различным, и в общем случае справедливо неравенство

$$\sum_{j=1}^{d_i} x_{ij} + \sum_{j=1}^{m_i} y_{ij} \leq T \text{ для всех } i = 1, 2, \dots, N.$$

2.6 Общая процедура и выбор методов статистического анализа

В предыдущем разделе были описаны стадии первичной обработки информации, в ходе которой идентифицировались тип и параметры схемы наблюдения, что в частности, предполагает выбор модели полного или минимального восстановления оборудования после отказов. На практике, однако, могут встречаться случаи, в которых не имеется

достаточно данных в пользу принятия каждой из моделей представления информации. Аналогичные проблемы характерны также и для последующих задач анализа данных, основная цель которых состоит в получении количественных оценок показателей надёжности оборудования (характерным примером является допущение о принадлежности выборочных данных определённому семейству распределений). В указанных ситуациях рекомендуется поочерёдно постулируя справедливость каждого из принимаемых допущений проводить проверку соответствия полученных результатов статистической обработки данных теоретическим выводам.

Данные задачи решаются в рамках теории проверки гипотез. В других ситуациях в распоряжении пользователя может быть достаточно данных для того, чтобы считать справедливыми те или иные модельные представления и задача статистической обработки может быть сразу сведена к оценке параметров указанных распределений. Следует также отметить, что в некоторых случаях более предпочтительными могут оказаться прямые непараметрические методы оценки показателей надёжности, для которых допущение о законе распределения вообще не существенно.

Таким образом, в условиях многообразия применяемых методов статистической обработки данных, имеющих свои преимущества, недостатки и граничные условия применения, пользователь нуждается в руководстве по выбору методов для конкретных условий решаемой им задачи. Рекомендации по выбору методов статистической обработки данных сведены в таблицу 2.6-1.

Свойство надёжности	Характеристика восстанавливаемости оборудования в процессе эксплуатации	Наличие априорной информации о виде закона распределения	Объём выборки (по полным наработкам)	Полнота выборки	Рекомендуемые к использованию статистические методы
Безотказность, долговечность	Не восстанавливаемое	Да	Большой (>50 событий)	Цензурированная или полная ¹	Оценка параметров распределения по полной выборке
			Средний (от 10 до 50 событий)	Полная	Оценка параметров распределения по полной выборке
				Цензурированная	Оценка параметров распределения по полной или цензурированной выборке
			Небольшой (до 10 событий)	Полная	Оценка параметров распределения по полной выборке
		Цензурированная		Оценка параметров распределения по цензурированной выборке. Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения	
		Нет	Большой (>50 событий)	Цензурированная или полная	Прямые непараметрические методы восстановления функции распределения
Средний (от 10 до 50 событий)	Полная		Оценка параметров стандартных распределений по полной выборке Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия		
				Цензурированная	Оценка параметров стандартных законов распределения по цензурированной выборке. Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия

Свойство надёжности	Характеристика восстанавливаемости оборудования в процессе эксплуатации	Наличие априорной информации о виде закона распределения	Объём выборки (по полным наработкам)	Полнота выборки	Рекомендуемые к использованию статистические методы
			Небольшой (до 10 событий)	Полная	Оценка параметров стандартных распределений по полной выборке Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения
				Цензурированная	Оценка параметров стандартных законов распределения по цензурированной выборке. Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения
	Восстанавливается, полнота восстановления известна	Да	Большой (>50 событий)	Цензурированная или полная	Оценка параметров распределения по полной выборке
Средний (от 10 до 50 событий)			Цензурированная ²	Оценка параметров распределения по цензурированной выборке	
Небольшой (до 10 событий)			Цензурированная	Оценка параметров распределения по цензурированной выборке Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения	
Нет		Большой (>50 событий)	Цензурированная или полная	Прямые непараметрические методы восстановления функции распределения	
		Средний (от 10 до 50 событий)	Цензурированная	Оценка параметров стандартных законов распределения по цензурированной выборке. Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия	

Свойство надёжности	Характеристика восстанавливаемости оборудования в процессе эксплуатации	Наличие априорной информации о виде закона распределения	Объём выборки (по полным наработкам)	Полнота выборки	Рекомендуемые к использованию статистические методы
			Небольшой (до 10 событий)	Цензурированная	Оценка параметров стандартных законов распределения по цензурированной выборке. Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения
	Восстанавливается, полнота восстановления не известна	Да	Большой (>50 событий)	Цензурированная или полная	Оценка параметров распределения по полной выборке в предположении полного восстановления Проверка отсутствия тренда по критерию инверсий. При наличии тренда - оценка параметров в предположении минимального восстановления
			Средний (от 10 до 50 событий)	Цензурированная	Оценка параметров распределения по цензурированной выборке в предположении полного восстановления. Проверка отсутствия тренда по критерию инверсий. При наличии тренда - оценка параметров в предположении минимального восстановления
			Небольшой (до 10 событий)	Цензурированная	Оценка параметров распределения по цензурированной выборке. Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения Проверка отсутствия тренда по критерию инверсий для объединённой выборки. При наличии тренда - оценка параметров в предположении минимального восстановления

Свойство надёжности	Характеристика восстанавливаемости оборудования в процессе эксплуатации	Наличие априорной информации о виде закона распределения	Объём выборки (по полным наработкам)	Полнота выборки	Рекомендуемые к использованию статистические методы
		Нет	Большой (>50 событий)	Цензурированная	<p>Прямые непараметрические методы восстановления функции распределения в предположении полного восстановления</p> <p>Проверка отсутствия тренда по критерию инверсий.</p> <p>При наличии тренда - оценка в предположении минимального восстановления</p>
			Средний (от 10 до 50 событий)	Цензурированная	<p>Оценка параметров стандартных законов распределения по цензурированной выборке.</p> <p>Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия</p> <p>Проверка отсутствия тренда по критерию инверсий.</p> <p>При наличии тренда - оценка параметров в предположении минимального восстановления</p> <p>Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия</p>
			Небольшой (до 10 событий)	Цензурированная	<p>Оценка параметров стандартных законов распределения по цензурированной выборке.</p> <p>Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия</p> <p>Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения</p> <p>Проверка отсутствия тренда по критерию инверсий для объединённой выборки.</p> <p>При наличии тренда - оценка параметров в предположении минимального восстановления</p> <p>Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия</p>

Свойство надёжности	Характеристика восстанавливаемости оборудования в процессе эксплуатации	Наличие априорной информации о виде закона распределения	Объём выборки (по полным наработкам)	Полнота выборки	Рекомендуемые к использованию статистические методы
Ремонтопригодность	Не применяется	Да	Большой (>50 событий) или средний (от 10 до 50 событий)	Полная	Оценка параметров распределения по полной выборке
			Небольшой (до 10 событий)	Полная	Оценка параметров распределения по полной выборке Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения
		Нет	Большой (>50 событий)	Полная	Прямые непараметрические методы восстановления функции распределения
			Средний (от 10 до 50 событий)	Полная	Оценка параметров стандартных законов распределения по полной выборке. Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия
			Небольшой (до 10 событий)	Полная	Оценка параметров стандартных законов распределения по полной выборке. Проверка соответствия стандартным законам по критериям согласия Анализ возможности объединения выборок полученных для разных объектов наблюдения

1 При большом объёме выборочных данных цензурированные наработки могут быть отброшены.

2 Для схем с восстановлением рассматриваются цензурированные выборки как общий случай. Схемы [NRr] и [NM_r] допускают представление в виде [N+r-1Ur].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОК ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ АЭС С ВВЭР-1000 ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ ПОДХОДОВ

Разработанная методология анализа эксплуатационной статистической информации была применена при подготовке исходных данных для ВАБ-1 проектов АЭС с ВВЭР-1000, сооружаемых по международным контрактам в Исламской Республике Иран и в Индии. Референтной АЭС для обоих сооружаемых блоков является Балаковская АЭС, в составе которой эксплуатируются 4 энергоблока с реакторной установкой В-320. Даты ввода в эксплуатацию энергоблоков представлены ниже в таблице 3-1.

Даты ввода в эксплуатацию блоков Балаковской АЭС

Таблица 3-1

№ п/п	АЭС, энергоблок	Тип РУ	Электрическая мощность МВт	Дата пуска
1	Балаковская АЭС, блок № 1.	В-320	1000	12. 1985г.
2	Балаковская АЭС, блок № 2.	В-320	1000	10. 1987г.
3	Балаковская АЭС, блок № 3.	В-320	1000	10.1988г.
4	Балаковская АЭС, блок № 4.	В-320	1000	04. 1993г.

Сбор информации проводился за десятилетний период с января 1990 по декабрь 1999г. (кроме энергоблока №4). Для указанного блока сбор данных производился с начала 1995 г, чтобы исключить период приработки.

Ввиду того, что оборудование систем безопасности является высоконадёжным, для получения более представительной информации об отказах оборудования использовались также эксплуатационные данные по 5-ти энергоблокам аналогичного типа на Запорожской АЭС (Украина). Сбор и первичная обработка эксплуатационной информации выполнялась специалистами ВНИИАЭС по специальному заданию, подготовленному в институте Атомэнергопроект. При этом, для получения наиболее полной и достоверной информации, наряду с выборкой событий из отраслевой базы данных проводился сбор информации непосредственно на Балаковской АЭС. Результаты сбора данных отражены в отчёте [9].

Следует отметить, что при разработке деревьев отказов систем безопасности учитывались следующие типы первичных событий:

– события, соответствующие неготовностям элементов в режиме дежурства вследствие критических отказов оборудования на периоде времени между испытаниями СБ;

– события, соответствующие неготовностям элементов вследствие их вывода из работы или дежурства на время вынужденного ремонта.

При этом второй тип первичных событий учитывает как критические так и не критические отказы элементов, так как в обоих случаях при обнаружении отказа работоспособное состояние оборудования должно быть восстановлено.

Таким образом для оборудования СБ, находящегося при нормальной эксплуатации блока в режиме дежурства была выполнена классификация отказов с целью их разделения на критическую и некритическую составляющие. В отношении критических отказов большинства элементов с использованием критерия χ^2 было установлено, что наработки элементов между отказами хорошо согласуются с гипотезой об экспоненциальном законе распределения.

Поскольку при разработке ВАБ один и тот же тип первичных событий использовался в качестве шаблона при задании исходных данных для групп однотипных элементов (например, запорная арматура с электроприводом), при оценке интенсивности отказов указанных групп элементов был применён подход, при котором учитывалась возможная неоднородность исходной статистической информации.

Ниже применение данного подхода проиллюстрировано на примере запорной арматуры.

Обобщённые данные по отказам арматуры на Балаковской АЭС в системах, перекачивающих среду 1-го контура представлены в таблице 3-2 ниже.

Таблица 3-2

	Маркировочное обозначение	, мм	Нормальное положение	Кол-во элементов в системе	Вид отказов				Суммарная наработка, ч
					На закрытие	На открытие	Ложное открытие	Ложное закрытие	
1.	YR51S01 YR52S01 YR53S01 YR61S01 YR62S01 YR63S01	65	Закрыта	6	1	3	1		1202622
2.	YT11S01 YT11S02 YT12S01 YT12S02 YT13S01 YT13S02 YT14S01 YT14S02	300	Открыта	8	3	1			923200
3.	TK21S04 TK22S04 TK23S04	100	Закрыта	3		1			346200

	Маркировочное обозначение	, мм	Нормальное положение	Кол-во элементов в системе	Вид отказов				Суммарная наработка, ч
					На закрытие	На открытие	Ложное открытие	Ложное закрытие	
4.	TK51S03 TK51S04 TK51S05 TK52S03 TK52S04 TK52S05 TK53S03 TK53S04 TK53S05 TK54S03 TK54S04 TK54S05	15	Открыта	12	3			2	1384800
5.	TQ13S05 TQ13S06 TQ13S07 TQ23S05 TQ23S06 TQ23S07 TQ33S05 TQ33S06 TQ33S07	125	Закрыта	9		1			1803933

	Маркировочное обозначение	, мм	Нормальное положение	Кол-во элементов в системе	Вид отказов				Суммарная наработка, ч
					На закрытие	На открытие	Ложное открытие	Ложное закрытие	
6.	TQ11S03 TQ11S10 TQ12S04 TQ21S03 TQ21S10 TQ22S04 TQ31S03 TQ31S10 TQ32S04 TQ40S01 TQ40S02 TQ40S03 TQ40S04 TQ41S01 TQ42S01 TQ43S01	300	Закрыта	16	4	4			3206992
7.	TQ12S06 TQ12S07 TQ22S06 TQ22S10 TQ32S06 TQ32S10	300	Открыта	6	7				1202622

	Маркировочное обозначение	, мм	Нормальное положение	Кол-во элементов в системе	Вид отказов				Суммарная наработка, ч
					На закрытие	На открытие	Ложное открытие	Ложное закрытие	
8.	TQ11S09 TQ11S02 TQ21S02 TQ21S09 TQ31S02 TQ31S09	150	Закрыта	6	3	4			1202622
9.	TQ41S02 TQ42S02 TQ43S02	300	Закрыта	3		3			601311
10.	TQ10S01 TQ20S01 TQ30S01	600	Открыта	3	2	1		1	601311
11.	TQ13S01 TQ13S26 TQ23S01 TQ23S26 TQ33S01 TQ33S26	150	Открыта	6					1202622

	Маркировочное обозначение	, мм	Нормальное положение	Кол-во элементов в системе	Вид отказов				Суммарная наработка, ч
					На закрытие	На открытие	Ложное открытие	Ложное закрытие	
12.	TQ11S06 TQ11S11 TQ11S12 TQ21S06 TQ21S11 TQ21S12 TQ31S06 TQ31S11 TQ31S12	50	Открыта	9	5	1			1803933

Для определения интенсивности отказов общей группы арматуры «на открытие» события, относящиеся к соответствующему виду отказов, были сгруппированы по подгруппам, объединяющим арматуру в пределах одной системы. Например, по всем системам САОЗ было сформировано четыре различные подгруппы, для каждой из которых постулировалось неизменность интенсивности отказов. Для каждой из подгрупп определялись суммарная наработка и количество отказов. Указанные исходные данные были обработаны в соответствии с методом, применяемым при объединении выборок, который был описан выше. Результаты обработки указанной информации представлены на рисунке 3-1.

Как видно из результатов выполненных расчётов, точечная оценка интенсивности отказов для всей группы арматуры составляет $1,97E-06$ 1/час., а приведённое к логарифмически-нормальной форме значение параметра неопределённости (фактора ошибки) составляет от 1,5 до 1,55 для различных формул приведения. Полученные результаты указывают на достаточно хорошую однородность статистических выборок, что в частности также подтверждается низким значением критерия неоднородности (1,09).

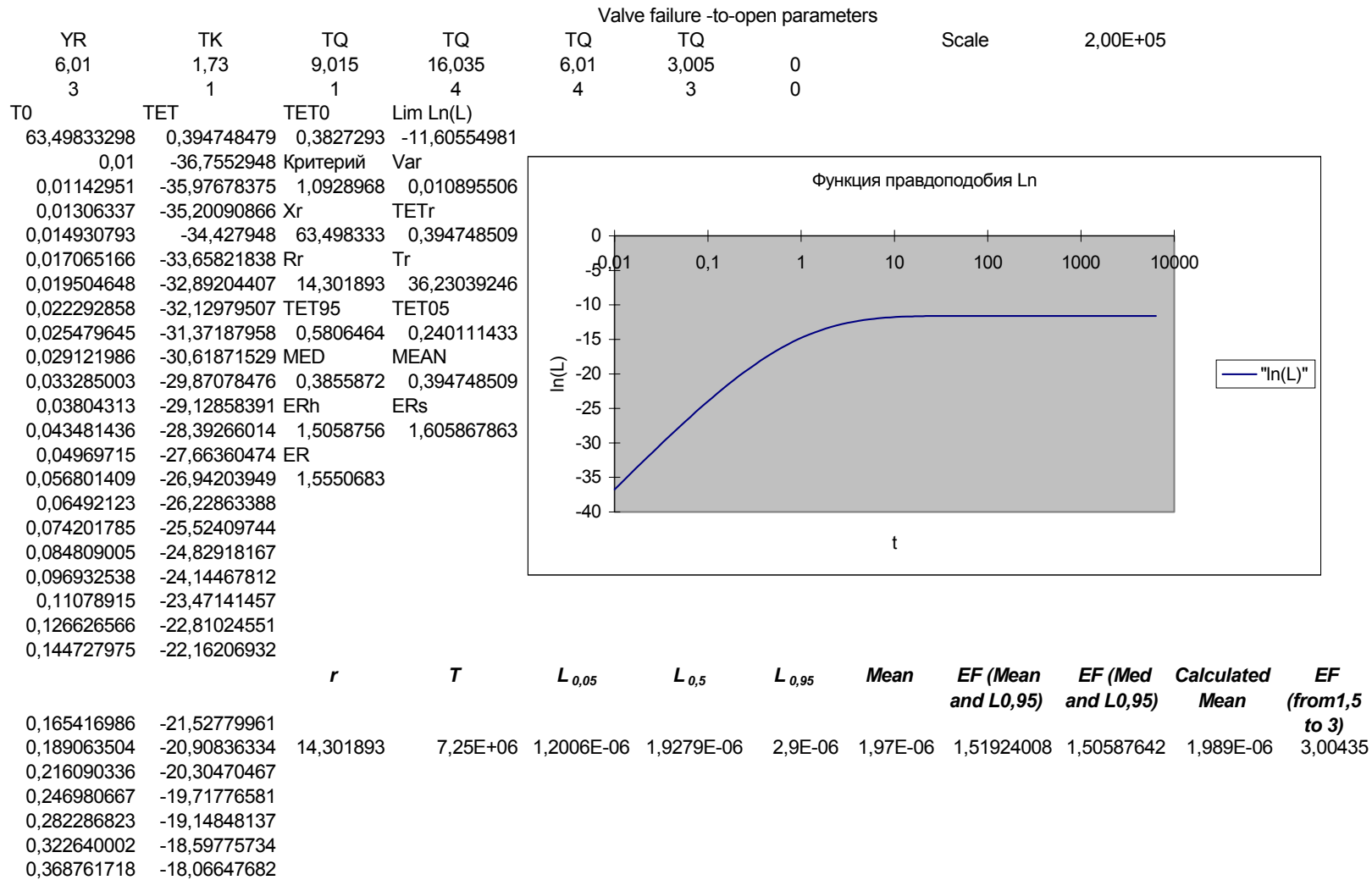


Рисунок 3-1

Список литературы

1. Ю.В.Швыряев, А.Ф.Барсуков, О.О.Красноярцева Применение ВАБ для действующих и проектируемых АЭС с реакторами ВВЭР-1000 (Балаковская АЭС). Международная встреча по безопасности АЭС с ВВЭР-1000, 7-11 апреля 2003 года, Пьештяны, Словакия
2. Yu.Shviriaev, G.Tokmachev, E.Baikova, V.Morozov, V.Zarubaev, V.Rozin, A.Bodrov. Novovoronezh Nuclear Power Plant In-Depth Safety Assessment NvNPP Unit 3 Probabilistic Safety Assessment. In: Proceedings of Forum 2000 "Safety Analysis for NPPs of VVER and RBMK Types", Paper P.18, held in Obninsk, Russia on 16 - 20 October 2000; available at the ftp site <ftp://qwerty@u2.ippe.obninsk.ru/pub/Forum2000>
3. Ю.В.Швыряев, Г.В.Токмачев, Е.В.Байкова Вероятностный анализ безопасности 4-го энергоблока Нововоронежской АЭС. ФГУП «Атомэнергопроект», Сборник трудов, выпуск 4 стр. 9-15, Москва, 2003.
4. Yu.Svyriaev, G.Tokmachev, and E.Baykova Results of updated PSA for advanced VVER-1000. Seventh International Information Exchange Forum on Safety Analysis (Forum-7), October 28-30, 2003, Piestany, Slovakia http://www.censee.org/text/forum/pres/p7_2.pdf
5. Рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций уровня 1 для внутренних иницирующих событий (при работе блока в режиме выработки электроэнергии во внешнюю сеть), Госатомнадзор России, РБ-024-02, Москва, 2002.
6. IAEA-SAFETY SERIES No. 50-P-4, IAEA, Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 1), (1992).
7. C.L. Atwood, J.L. LaChance, H.F. Martz, et al. Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment. U.S. NRC, NUREG/CR-6823, September 2003.
8. Morozov, V., A treatment of uncertainties for component reliability or initiator frequency estimates based on combining data sources with the potential of non-homogeneity, PSA 99 International Topical Meeting, Washington, DC August 1999.