

УДК 621.039.5

А.М. Бахметьев, И.А. Былов, Е.А. Звягин, Л. Абрамов

**ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Введение

Электроэнергия присутствует практически во всех сферах жизнедеятельности человека и непосредственно влияет на ее качество, поэтому аварии в сфере производства и передачи электроэнергии наносят непоправимый урон как экономической, так и социальной сферам нашей жизни.

Недавние аварии на объектах энергетики, особенно авария на Саяно-Шушенской ГЭС, остро поставили вопрос об оценке уровня безопасности действующих и проектируемых объектов энергетики, как основы для ее обеспечения и повышения в будущем.

Объекты энергетики, несомненно, представляют собой сложные социотехнические системы, для которых одним из наиболее эффективных методов исследования и, практически, единственным инструментом комплексной оценки безопасности, позволяющим получать качественные и количественные характеристики риска аварий, является вероятностный анализ безопасности. На заседании Совета генеральных и главных конструкторов, ведущих ученых и специалистов в области высокотехнологичных секторов экономики при Председателе Правительства, состоявшемся в декабре 2009 года была поставлена задача обязательного применения методов вероятностного анализа безопасности (ВАБ) при проектировании, эксплуатации и реконструкции объектов энергетики [1].

Вероятностный анализ безопасности получил широкое распространение для оценки безопасности объектов использования атомной энергии. Современные отечественные требования к анализу и обоснованию безопасности ядерных установок, руководства МАГАТЭ предусматривают использование детерминистских и вероятностных методов как необходимого условия полноты исследования безопасности на всех этапах жизненного цикла ядерной установки (ЯУ).

Вероятностный анализ безопасности опасных промышленных объектов представляет собой сложную комплексную задачу системного анализа, выполнение которой невозможно без разработки и использования соответствующего методического и программного обеспечения.

ОАО «ОКБМ Африкантов» обладает большим опытом выполнения вероятностных анализов безопасности ЯУ различного назначения. В настоящей статье представлено описание программно-методического обеспечения для ВАБ, разработанного специалистами предприятия и результаты его прикладного использования.

1. Методические положения по решению задач вероятностного анализа безопасности

При выполнении вероятностного анализа безопасности решаются следующие основные задачи (рис. 1):

- организация выполнения ВАБ (разработка план-графика работ и программы обеспечения качества);
- выбор и группирование инициирующих событий;
- моделирование аварийных последовательностей;
- анализ надёжности систем;

- сбор и анализ исходных данных;
- анализ надёжности персонала;
- количественный анализ;
- интерпретация и представление результатов.

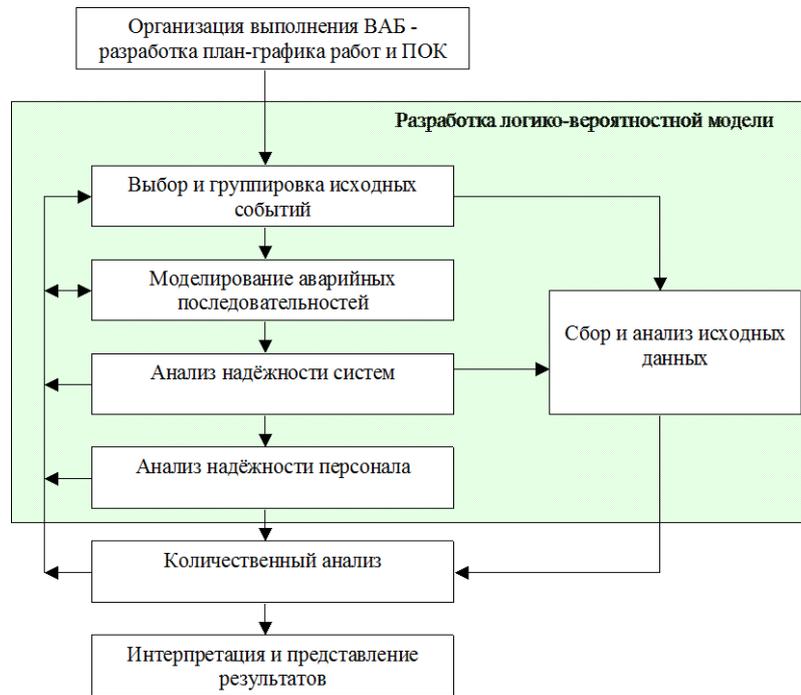


Рис. 1. Основные задачи вероятностного анализа безопасности

Рекомендации по выполнению задач ВАБ для энергоблоков атомных станций представлены в документах МАГАТЭ [2, 3], руководствах по безопасности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [4, 5]. Однако, данные документы не содержат полного объема методических положений, позволяющих решать задачи вероятностного анализа безопасности.

В развитие требований нормативных документов, руководств МАГАТЭ специалистами ОАО «ОКБМ Африкантов» совместно с ФГУ РНЦ «Курчатовский институт», ФГУ «ГЦНИИ МО РФ» были разработаны руководства и методики по выполнению задач вероятностного анализа безопасности транспортных ядерных установок.

Комплект документов включает общее руководство по проведению вероятностного анализа, в котором определены назначение и область применения разработанных методик, общие положения по организации работ и выполнению задач ВАБ, методики выполнения задач ВАБ, руководство по сбору и анализу данных, структура и содержание банка данных по надёжности элементов оборудования и частотам исходных событий, необходимых для проведения вероятностного анализа безопасности.

Общее руководство дополняется требованиями к программе обеспечения качества при вероятностном анализе безопасности ЯУ. В руководстве сформулированы задачи по обеспечению качества выполняемых работ по трем основным направлениям:

- организация и управление разработкой ВАБ;
- выполнение собственно вероятностного анализа безопасности;
- разработка документации ВАБ.

В отдельном руководстве представлены требования по документированию результатов вероятностного анализа безопасности. Рассмотрены общие и специфические требования к заключительной документации проекта и общие требования к рабочей (детальной) документации по задачам.

Результатом решения задач ВАБ является формирование логико-вероятностной модели ЯУ. Логико-вероятностная модель ЯУ строится по результатам анализа (моделирования) аварийных последовательностей (построения деревьев событий), анализа (моделирования) систем и действий персонала и включает всю совокупность указанных моделей. Исследование сложной логико-вероятностной модели ЯУ невозможно без соответствующего программного обеспечения.

2. Программный комплекс для вероятностного анализа безопасности ЯУ

Основу программного обеспечения для анализа надежности и безопасности ЯУ составляет отечественный программный комплекс для выполнения вероятностного анализа безопасности CRISS. Программный комплекс (ПК) CRISS разрабатывается и совершенствуется в ОАО «ОКБМ Африкантов» в течение последних 20 лет и является первым отечественным программным продуктом, внедренным в практику вероятностного анализа безопасности ЯУ. ПК CRISS различных поколений, начиная с конца 80-х годов, широко использовались как для поддержки проектирования новых установок, так и сопровождения эксплуатации действующих ЯУ.

В настоящее время в эксплуатации находится программный комплекс IV поколения CRISS 4.0 [6]. Программа CRISS 4.0 аттестована Ростехнадзором в 2006 году и эксплуатируется в ОАО «ОКБМ Африкантов», ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», на Белоярской АЭС, а также используется для поддержки учебного процесса в ИАТЭ (г. Обнинск), Нижегородском государственном техническом университете, Уральском государственном техническом университете (г. Екатеринбург).

Опыт эксплуатации программного средства CRISS 4.0 и его аттестации, нормативное расширение номенклатуры задач вероятностного анализа безопасности определили необходимость дальнейшего развития и совершенствования программы. На базе CRISS 4.0 в 2007–2009 годах разработан программный комплекс CRISS 5.1 [7], с использованием которого могут быть решены задачи полномасштабного вероятностного анализа безопасности различных уровней с использованием методов деревьев отказов и деревьев событий.

Программный комплекс CRISS 5.1 построен на базе архитектуры «клиент-сервер» с использованием единой администрируемой базы данных с разграничением прав пользователей на внесение изменений. В качестве СУБД используется Oracle Database 10g Express Edition.

Программа позволяет:

- накапливать в базах данных информацию о составе систем безопасности, исходных событиях аварий, учитываемых ошибках персонала и показателях надежности оборудования ЯУ, включая параметры моделей учета отказов по общей причине (ООП), частотах исходных событий, регламенте проверок работоспособности элементов систем безопасности;
- управлять реляционными базами данных;
- создавать и редактировать деревья отказов (ДО) с использованием логических операторов «И», «ИЛИ», «М из N»;
- создавать и редактировать деревья событий (ДС);
- проводить качественный и количественный анализ деревьев отказов и деревьев событий с автоматизированным учетом ООП;
- выполнять анализ значимости, чувствительности и неопределенности;
- редактировать минимальные сечения;
- выводить на печать и сохранять в стандартном формате Microsoft Word графические изображения ДО и ДС, результаты качественного и количественного анализа, анализа значимости, чувствительности и неопределенности;
- разрабатывать новые формы отчетов и редактировать имеющиеся;
- разграничивать права доступа пользователей для работы с программой;

- осуществлять оперативную верификацию программы после ее корректировки (модернизации);
- импортировать базы данных и логические модели (деревья отказов и деревья событий) из зарубежных программ (SAPHIRE и Risk Spectrum) для выполнения ВАБ.

В программном комплексе CRISS 5.1 был внедрен усовершенствованный алгоритм генерации минимальных сечений, позволяющий на несколько порядков повысить быстродействие программы, расширены функциональные возможности интерфейса программы. Логика и основные элементы интерфейса программы наследуются у программного средства CRISS 4.0; его внешний вид и функции доработаны с учетом рекомендаций и замечаний пользователей по опыту эксплуатации.

В 2009 году в ОАО «ОКБМ Африкантов» выполнена верификация программы CRISS 5.1. В настоящее время программный комплекс CRISS 5.1 проходит процедуру аттестации в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору.

С использованием программного комплекса CRISS были выполнены вероятностный анализ безопасности 1 уровня энергоблока № 3 Белоярской АЭС [8] для получения лицензии на продление эксплуатации энергоблока, плавучего энергоблока с реакторной установкой КЛТ-40С [9] для получения лицензии на сооружение и ряду других ЯУ.

Наличие быстродействующей программы для вероятностного анализа позволяет формировать системы мониторинга риска ЯУ в процессе их эксплуатации.

3. Система мониторинга риска «РИМ»

Целью внедрения технологии мониторинга риска является осуществление непрерывной оценки и контроля изменения количественных показателей безопасности, которые могут происходить вследствие возникновения при эксплуатации энергоблока различных событий, приводящих к нарушению нормальной эксплуатации или к изменению конфигурации (структуры) систем безопасности вследствие вывода в плановый или неплановый ремонт их компонентов.

Разрабатываемая в ОАО «ОКБМ Африкантов» система мониторинга риска (СМР) «РИМ» обеспечивает поддержку решения следующих задач:

- оценка в режиме реального времени вероятностных показателей безопасности (вероятностей повреждения активной зоны и большого выброса радиоактивных веществ за пределы энергоблока) в различных состояниях установки и для различных типов исходных событий;
- оценка допустимого времени вывода в ремонт или на техническое обслуживание определенного набора оборудования, т.е. времени существования определенных конфигураций систем энергоблока;
- сравнение различных вариантов и оптимизация регламента технического обслуживания и ремонтов при условии выполнения ограничений на показатели безопасности (перераспределение работ между различными состояниями энергоблока, сокращение объема работ, уточнение допустимого времени вывода в ремонт при работе реактора на мощности и др.);
- определение наиболее критичных эксплуатационных процедур с точки зрения безопасности и подготовка рекомендаций по их совершенствованию;
- анализ и ранжирование по значимости событий «предшественников аварий» с целью принятия дополнительных мер защиты к наиболее критичным событиям;
- развитие широко распространяющегося в США и других странах подхода к принятию решений по объему эксплуатационных процедур на основе информации о риске;
- обоснование перед надзорными органами изменений в технических решениях и регламенте эксплуатации энергоблока;
- ранжирования по значимости для безопасности различного оборудования;
- обучение персонала АС в части значимости для безопасности различных систем и со-

бытий; планирования процедур технического обслуживания и ремонта без существенного снижения уровня безопасности;

- вспомогательные задачи по обеспечению хранения необходимых баз данных.

Логико-вероятностные модели энергоблока разрабатываются с помощью программного комплекса для выполнения ВАБ CRISS 5.1.

Система мониторинга риска «РИМ» построена на базе архитектуры «клиент-сервер» с использованием единой администрируемой базы данных с разграничением прав пользователей на внесение изменений. В качестве СУБД используется Oracle Database 10g Express Edition.

Предусмотрен обмен информацией между СМР «РИМ», информационно-поисковой системой «Источник-БН», программным комплексом для ВАБ CRISS 5.1 и системой планирования технического обслуживания и ремонтов Белоярской АЭС.

В ИПС «Источник-БН» накапливается актуальная информация по надежности элементов СВБ и интенсивностям исходных событий, что позволяет актуализировать соответствующую базу данных СМР. Связь с СПТОР обеспечивает систему мониторинга риска актуальной информацией о текущем состоянии оборудования и планируемых техническом обслуживании и ремонтах.

По результатам выполненных проработок и обсуждения с персоналом Белоярской АЭС в ОАО «ОКБМ Африкантов» в конце 2010 года будет разработана версия системы мониторинга риска «РИМ» для опытно-промышленной эксплуатации на энергоблоке № 3 Белоярской АЭС.

4. Система аналитического мониторинга надежности и безопасности ЯУ

Для обеспечения надежности и безопасности ЯУ фундаментальное значение имеет реализация процесса систематического, всестороннего исследования (мониторинга) опыта эксплуатации ЯУ, причин и условий возникновения нарушений нормальной эксплуатации оборудования и установок, уточнения прогнозов и выработки мер по предотвращению нежелательных событий. В федеральных нормах и правилах, рекомендациях МАГАТЭ сформулированы требования по решению отмеченных задач.

Для выполнения этих требований для всех действующих ЯУ и ответственного оборудования разработки ОАО «ОКБМ Африкантов» на базе семейства ИПС «Источник» созданы системы аналитического мониторинга надежности и безопасности [10, 11].

Система аналитического мониторинга представляет собой постоянно действующую человеко-машинную систему, обеспечивающую:

- сбор информации в определенном формате;
- создание компьютерной базы данных в рамках ИПС;
- анализ полученных данных с оценкой показателей надежности, индикаторов безопасности, тенденций их изменения;
- выработку рекомендаций по результатам анализа, анализ эффективности внедряемых мероприятий;
- поддержку эксплуатирующей организации по вопросам обобщения информации, автоматизированной подготовки регулярных сообщений (отчетов по эксплуатации);

Система аналитического мониторинга надежности и безопасности энергоблока с реакторной установкой БН-600 разработана и внедрена ОКБМ совместно с Белоярской АЭС на базе ИПС «Источник-БН». В ИПС «Источник-БН» за период с начала эксплуатации энергоблока до текущего момента времени создана база данных по надежности оборудования реакторной установки БН-600, по готовности энергоблока БН-600, по нарушениям в работе БН-600, включая информацию по неплановым случаям отключений петель и срабатываниям аварийной защиты. Накопленные данные регулярно актуализируются и используются при подготовке ежегодных отчетов по авторскому сопровождению эксплуатации установки БН-600. Информационно-поисковая система, наряду с ОКБМ, установлена на Белоярской АЭС, между предприятиями формируется электронный обмен данными. В дальнейшем планируется интеграция работы ИПС "Источник-БН" с системой поддержки технического обслужива-

ния и ремонта Белоярской АЭС в части обеспечения информационного взаимодействия систем, предусматривается расширение номенклатуры накапливаемых данных с увеличением функциональных возможностей ИПС применительно к задачам, решаемым Белоярской АЭС.

Аналитический мониторинг надежности и безопасности ЯУ атомных судов осуществляется ОКБМ с использованием ИПС «Источник-С». ИПС «Источник-С» внедрена на судах ФГУП «Атомфлот». В ИПС «Источник-С» создана база данных по надежности оборудования ЯУ, фактическим моделям эксплуатации ЯУ, нарушениям в работе ЯУ и др. База данных охватывает период с начала эксплуатации установок, постоянно обновляется и актуализируется по результатам эксплуатации. ИПС «Источник-С» используется эксплуатирующей организацией для автоматизированного формирования сообщений о срабатывании аварийной защиты реактора, месячных донесений и годовых отчетов по эксплуатации ЯУ.

При формировании системы аналитического мониторинга надежности ГЦН АЭС с реакторами РБМК и ГЦН БН-600 ОАО «ОКБМ Африкантов» была разработана ИПС система «Источник-Н». Для обеспечения функционирования системы аналитического мониторинга надежности ГЦН АЭС с реакторами РБМК и ГЦН БН-600 был разработан, согласован с АЭС и утвержден ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Регламент сбора, анализа и использования эксплуатационных данных по надежности насосного оборудования» и была проведена опытно-промышленная эксплуатация системы [12]. С учетом положительных результатов опытно-промышленной эксплуатации системы Регламент функционирования системы был введен в эксплуатацию приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом».

Информационно-поисковая система «Источник-Н» разработана ОАО «ОКБМ Африкантов» на базе СУБД Oracle, построена по архитектуре «клиент-сервер» и поддерживает большое количество пользователей. В ИПС используется универсальный формат данных для сбора информации по опыту эксплуатации оборудования. Система обеспечивает структурированное хранение информации, систематизацию и обработку данных, имеет развитую систему поиска и обмена данными.

В ИПС «Источник-Н» создана база данных по надежности ГЦН АЭС с реакторами РБМК и ГЦН БН-600 за период с начала эксплуатации по настоящее время.

Заключение

1. Применение методов вероятностного анализа безопасности при проектировании, эксплуатации и реконструкции объектов энергетики требует разработки соответствующего программно-методического обеспечения.

2. ОАО «ОКБМ Африкантов» разработано, аттестовано и используется при проектировании и сопровождении эксплуатации ЯУ программно-методическое обеспечение для анализа надежности и безопасности.

3. Разработанное отечественное программно-методическое обеспечение способно решать задачи:

- полномасштабного вероятностного анализа безопасности различных уровней;
- мониторинга риска в процессе эксплуатации ЯУ;
- аналитического мониторинга надежности и безопасности ЯУ и ответственного оборудования.

4. С использованием программно-методического обеспечения разработки ОАО «ОКБМ Африкантов»:

- разработаны вероятностные анализы безопасности 1-го уровня для реакторной установки БН-600 энергоблока № 3 Белоярской АЭС и плавучего энергоблока с реакторной установкой КЛТ-40С для поддержки процесса лицензирования;
- совместно с эксплуатационным персоналом Белоярской АЭС разработана и готовится к опытно-промышленной эксплуатации на станции система мониторинга риска;

- реализована и внедрена на Белоярской, Курской, Смоленской и Ленинградской АЭС система аналитического мониторинга надежности и безопасности ЯУ и ответственного оборудования.

Библиографический список

1. Протокол заседания Совета генеральных и главных конструкторов, ведущих ученых и специалистов в области высокотехнологичных секторов экономики при Председателе Правительства от 07 декабря 2009 г. № 4, г. Москва.
2. Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants (level 1). Safety Series №50-P-4, IAEA, Vienna, 1992.
3. Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 2) Safety Series №.50-P-8. IAEA, Vienna, 1995.
4. Рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций уровня 1 для внутренних иницирующих событий. РБ-024-02 //Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. -М., 2002.
5. Основные рекомендации к вероятностному анализу безопасности уровня 2 атомных станций с реакторами типа ВВЭР РБ-044-09 // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. -М., 2009.
6. **Бахметьев, А.М.** К вопросу о системном исследовании безопасности ядерных установок с использованием вероятностных методов / А.М. Бахметьев, И.А. Былов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2006. №1.
7. Совершенствование программного обеспечения для проведения вероятностного анализа безопасности ядерных установок / А.М. Бахметьев [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2008. №2.
8. Использование ВАБ при обосновании продления срока эксплуатации энергоблока с реактором БН-600 / П.С. Антипин [и др.] // Безопасность окружающей среды. 2009. № 2.
9. Вероятностный анализ безопасности плавучей АТЭС с водо-водяным реактором КЛТ-40С / А.М. Бахметьев [и др.] // Практика разработки ВАБ и использования их результатов для действующих и вновь проектируемых АЭС с ВВЭР: материалы научно-технич. конф. – М., 2002.
10. О системе мониторинга надежности и безопасности установки БН-600» / А.М. Бахметьев [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2006. № 1.
11. Система аналитического мониторинга надежности насосного оборудования АЭС / А.М. Бахметьев [и др.] // Доклады на научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. – Обнинск: ИАТЭ, 2010.
12. Регламент сбора, анализа и использования эксплуатационных данных по надежности насосного оборудования № НД/329 от 16 марта 2006 г. – М.: Росэнергоатом, 2006.

Дата поступления
в редакцию 04.08.2012

A. Bakhmeyev, I. Bylov, E. Zvyagin, L. Abramov

METHODS AND SOFTWARE FOR POWER UTILITIES PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT UNDER DESIGN AND OPERATING

Joint stock company «OKBM Afrikantov »

Purpose: Safety analysis of power utilities as complex socio-technical systems is important and urgent problem. Probabilistic safety assessment (PSA) is one of the most effective tool for quantitative safety assessment of such utilities.

Design/methodology/approach: Probabilistic safety assessment methods are widely used for safety assessment of nuclear utilities. PSA development under design and operating of nuclear utilities is a regulatory requirement.

Findings: JSC «Афrikantov OKBM» has an wide experience in PSA development for nuclear utilities of different purposes. OKBM specialists worked out software for all PSA tasks fulfillment during nuclear utilities design and operation.

Research limitations/implications: The present study provides description of CRISS PSA software, RIM risk monitor and reliability and safety monitoring system Istochnik.

Originality/value: Above-mentioned PSA software used for safety analysis of OKBM designed nuclear utilities and may be used for safety analysis of power utilities.

Key words: probabilistic safety assessment, software, reliability, safety