

## РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК ПРОЕКТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ «ПРОРЫВ»

**Л.В. Абрамов, А.М. Бахметьев, И.А. Былов, А.А. Васюченко**

*АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»  
603704, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15*



Выполнение вероятностного анализа безопасности (ВАБ) предусматривает разработку сложной компьютерной модели ядерной установки с проведением всестороннего исследования надежности и безопасности, что требует соответствующего программного обеспечения. В рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» АО «ОКБМ Африкантов» в 2013 – 2015 гг. была выполнена разработка и верификация программного комплекса CRISS 5.3 для ВАБ.

Представлен обзор программных средств, используемых в отрасли для выполнения ВАБ энергоблоков АЭС с анализом их возможностей.

Дано краткое описание программного комплекса CRISS 5.3, предназначенного для моделирования и анализа систем безопасности и ядерной установки в целом при проведении вероятностного анализа безопасности на всех этапах жизненного цикла ядерной установки.

Приведены результаты верификации программного комплекса CRISS 5.3, которая осуществлялась путем сравнения результатов анализа по программе CRISS 5.3 с аналитическими формулами и результатами качественного и количественного анализа по аттестованным программным средствам для ВАБ ядерных установок.

**Ключевые слова:** вероятностный анализ безопасности, ядерная установка, верификация, программное средство, дерево отказов, дерево событий.

### ВВЕДЕНИЕ

Для выполнения вероятностного анализа безопасности (ВАБ) предусматривается разработка сложной компьютерной модели ядерной установки с проведением всестороннего исследования надежности и безопасности, требующей соответствующего программного обеспечения.

В рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» и проектного направления «Прорыв» реализуется проект «Коды нового поколения». В рамках этого проекта АО «ОКБМ Африкантов» в 2013 – 2015 гг. для ВАБ была выполнена разработка и верификация программного комплекса (ПК) CRISS 5.3.

© Л.В. Абрамов, А.М. Бахметьев, И.А. Былов, А.А. Васюченко, 2016

Для ядерных установок (ЯУ), разрабатываемых в рамках проектного направления «Прорыв», характерны следующие особенности:

- усложненные логико-вероятностные модели ЯУ;
- учет большого объема аварийных последовательностей, в том числе и с низкими вероятностями реализации;
- выполнение анализа надежности систем с высокой кратностью резервирования;
- снижение уровня отсеечения вероятностей минимальных сечений на несколько порядков при анализе.

Указанные особенности определили основные требования к разработанному ПК для ВАБ.

Рассмотрим программные комплексы для выполнения ВАБ, используемые в российской атомной энергетике, а также кратко опишем структуру, основные функции и результаты верификации программного комплекса CRISS 5.3.

### **ОБЗОР ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ОТРАСЛИ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ВАБ**

В настоящее время в России для выполнения ВАБ энергоблоков атомных станций используются, в основном, программные комплексы RiskSpectrum (Швеция) [1] и CRISS (Россия) [2].

ПК RiskSpectrum является одним из наиболее широко используемых программных средств для выполнения ВАБ ядерных установок. В частности, ПК RiskSpectrum PSA предназначен для решения всего спектра задач по разработке и анализу логико-вероятностной модели ядерной установки в рамках выполнения ВАБ первого и второго уровней [3]. Поэтому в настоящее время в России выполнены и выполняются ВАБ первого и второго уровней для энергоблоков АЭС с ВВЭР и РБМК с использованием этого ПК.

Программный комплекс CRISS разрабатывается и совершенствуется специалистами АО «ОКБМ Африкантов» в течение последних 25-ти лет. ПК CRISS различных поколений начиная с конца 1980-х – начала 1990-х гг. широко использовались для поддержки проектирования и выполнения ВАБ ядерных установок различных типов (табл. 1).

Таблица 1

#### **Разработка отечественного программного комплекса CRISS для ВАБ**

| Временной период                 | Комплекс               | Особенности                       | Практическое использование   |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| Конец 1980-х – начало 1990-х гг. | TREES<br>CRISS         | EC-1066                           | АСТ-500, БН-600, БН-800, ВПБЭР-600, установки малой мощности                                   |
| Конец 1990-х гг.                 | CRISS 2.0              | IBM PC,<br>MS DOS                 | ВАБ Воронежской АСТ и АСТ СХК  |
| 2001 – 2002 гг.                  | CRISS 3.0<br>CRISS 3.1 | IBM PC,<br>MS DOS →<br>MS Windows | ВАБ ГТ-МГР,<br>ВАБ АТЭС с плавучим энергоблоком  |
| 2004 – 2009 гг.                  | CRISS 4.0              | IBM PC,<br>MS Windows 98          | ВАБ БН-600, установки малой и средней мощности.<br>Обучение специалистов отрасли               |
| С 2009 г. по настоящее время     | CRISS 5.1              | IBM PC,<br>MS Windows XP, 7       | ВАБ БН-600, БН-800, БН-1200, ПАТЭС с РУ КЛТ-40С, ЯЭУ УАЛ с РУ РИТМ-200, ВАБ ХОЯТ на ФГУП «ГХК» |

В настоящее время в эксплуатации находится ПК пятого поколения CRISS 5.1 [4]. В 2011 г. этот комплекс был аттестован Ростехнадзором для проведения вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии.

Модернизированный программный комплекс для ВАБ ядерных установок должен обеспечивать

- отсутствие ограничений на размерность логико-вероятностных моделей;
- выполнение анализа сложных моделей большой размерности с высоким быстродействием;
- исключение погрешности при объединении отдельных моделей систем и аварийных последовательностей в интегральную модель ядерной установки;
- использование универсальных моделей учета отказов по общей причине для высокорезервированных систем.

Модернизация программного комплекса CRISS также включала в себя реализацию алгоритма определения оптимального состава системы по экономическим показателям при заданном уровне надежности.

### **ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС CRISS 5.3**

Программный комплекс CRISS 5.3 предназначен для моделирования и анализа систем безопасности и ядерной установки в целом при проведении ВАБ на всех этапах жизненного цикла ядерной установки.

ПК CRISS 5.3 построен на базе архитектуры «клиент-сервер» с использованием единой администрируемой базы данных, позволяющей разграничивать права пользователей на внесение изменений. В качестве СУБД используется Oracle Database 11g Express Edition.

В серверной части программного комплекса расположена база данных, включающая в себя базы показателей надежности, систем безопасности, деревьев отказов, деревьев событий и вариантов анализа. Серверная часть ПК обеспечивает целостность хранимых данных и аутентификацию пользователей согласно имеющимся данным. Клиентская часть обеспечивает интерфейсы работы пользователя с базами данных программного комплекса, построение вероятностной модели в редакторах деревьев отказов и деревьев событий, проведение качественного и количественного анализа вероятностных моделей, исследование и документирование результатов анализа.

Расчетный модуль модернизированного программного комплекса CRISS 5.3 реализован с использованием алгоритмов параллельных вычислений и обеспечивает сокращение времени анализа логико-вероятностных моделей по сравнению с аттестованной версией программного комплекса CRISS 5.1.

Обобщенная блок-схема программного комплекса показана на рис. 1.

Программный комплекс позволяет

- накапливать в базах данных информацию о составе систем безопасности, исходных событиях аварий, учитываемых ошибках персонала и показателях надежности оборудования ядерной установки, включая параметры моделей учета отказов по общей причине, частотах исходных событий, регламенте проверок работоспособности элементов систем безопасности;
- управлять реляционными базами данных;
- осуществлять копирование данных между проектами, экспорт и импорт данных проектов;
- создавать и редактировать деревья отказов с использованием логических операторов «И», «ИЛИ», «М из N», отрицания;
- создавать и редактировать деревья событий;

- проводить качественный и количественный анализ деревьев отказов и деревьев событий с автоматизированным учетом ООП с использованием моделей биномиальной интенсивности отказов, бета-фактора и альфа-фактора, множественных греческих букв;
- выполнять анализ значимости, чувствительности и неопределенности (анализ неопределенности выполняется методом Монте-Карло, основанным на выборе случайных значений показателей надежности базисных событий);
- выполнять анализ видов и последствий отказов;
- редактировать минимальные сечения;
- выполнять оптимизацию состава системы по экономическим показателям;
- 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;
- импортировать (экспортировать) базы данных и логические модели (деревья отказов и деревья событий) из программного средства Risk Spectrum PSA Professional, используемого в отрасли для выполнения ВАБ;
- разрабатывать новые формы отчетов и редактировать имеющиеся;
- разграничивать права доступа пользователей для работы с программой.

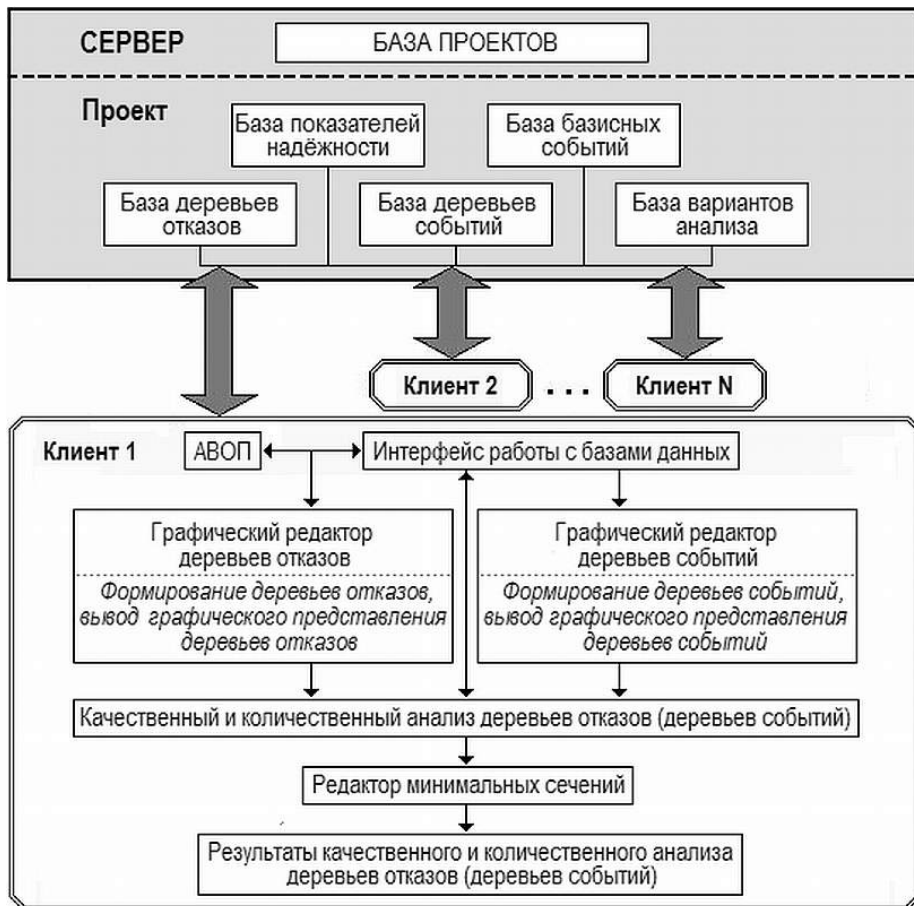


Рис. 1. Обобщенная блок-схема программного комплекса CRISS 5.3

С помощью программного средства CRISS 5.3 могут быть решены задачи полномасштабного вероятностного анализа безопасности, выполняемого методами деревьев отказов и деревьев событий. Программа не накладывает ограничений на размерность моделей ВАБ.

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CRISS 5.3 ДЛЯ ВАБ**

В 2015 г. в АО «ОКБМ Африкантов» выполнена верификация комплекса CRISS 5.3. Верификация осуществлялась путем сравнения результатов анализа по программе CRISS 5.3 с аналитическими формулами (аналитические тесты) и результатами качественного и количественного анализа по аттестованным программным средствам для ВАБ ядерных установок: CRISS 5.1 и RiskSpectrum PSA Professional (расчетные тесты). В состав матрицы верификации ПК CRISS 5.3 также был включен набор сложных логико-вероятностных моделей для оценки быстродействия верифицируемой программы.

При проведении верификации программного обеспечения, предназначенного для анализа надежности систем и вероятностного анализа безопасности, результаты экспериментов не используются. Успешная верификация подобных программ предполагает полное совпадение результатов расчетов для аналитических тестов. Для расчетных тестов расхождение результатов анализа с использованием различных программ при одинаковых исходных данных может быть обусловлено различием в используемых алгоритмах. Данный подход к проведению верификации программного обеспечения для ВАБ был использован при аттестации предыдущих версий программного комплекса CRISS [5] и других отечественных программных средств аналогичного назначения [6].

Таблица 2

**Результаты верификации программного комплекса CRISS 5.3**

| Тестовый пример   | Результаты анализа |           |                           |
|---|--------------------|-----------|---------------------------|
|   | CRISS 5.3          | CRISS 5.1 | RiskSpectrum Professional |
| Тестовый пример С.1                                     | 3.04E-04           | 3.038E-04 | 2.99E-04                  |
| - независимые отказы                                    | 1.98E-03           | -         | 1.94E-03                  |
| - учет ООП по модели $\alpha$ -фактора                  | 5.71E-04           | -         | 5.62E-04                  |
| - учет ООП по MGL-модели                                | 7.18E-04           | -         | 7.07E-04                  |
| - учет ООП по модели биномиальной интенсивности отказов | 1.89E-03           | 1.89E-03  | -                         |

Сопоставление результатов расчетов по тестовым примерам позволяет сделать следующие выводы.

– Выполнение качественного анализа логико-вероятностных моделей аналитических тестов вручную и с помощью программы CRISS 5.3 дает идентичные результаты – одинаковые наборы минимальных сечений как в предположении независимых отказов, так и с учетом ООП.

– Результаты количественного анализа по аналитическим тестам вручную и по программе CRISS 5.3 не имеют расхождения.

– Выполнение качественного анализа логико-вероятностных моделей расчетных тестов по программе RiskSpectrum PSA Professional, аттестованной программе CRISS 5.1 и с помощью программы CRISS 5.3 дает идентичные результаты – одинаковые наборы минимальных сечений как в предположении независимых отказов, так и с учетом ООП.

– Количественный анализ расчетных тестовых примеров с использованием программы CRISS 5.3 и CRISS 5.1 дает идентичные результаты.

– Количественный анализ по ряду расчетных тестовых примеров с использованием программы CRISS 5.3 по сравнению с Risk Spectrum Professional дает идентичный или более консервативный результат (до 4%) в силу более точного учета в алгоритме программы отказов в режиме ожидания в резервированных системах.

Результаты верификации по расчетному тестовому примеру С.1, представляющему собой сложное дерево отказов, моделирующее одну из систем безопасности ядерной установки с реактором БН, приведены в табл. 2.

– Коэффициент ускорения времени выполнения анализа по программе CRISS 5.3 в сравнении с CRISS 5.1 составляет от 2 до 3.3. Результаты сравнения времени выполнения анализа по CRISS 5.3 и RiskSpectrum последней версии 1.1.3 показывают, что программы находятся на одном уровне по быстродействию.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В рамках проекта «Коды нового поколения» АО «ОКБМ Африкантов» в 2013 – 2015 гг. были выполнены разработка и верификация программного комплекса для ВАБ CRISS 5.3.

Программный комплекс CRISS 5.3 позволяет эффективно решить задачи полномасштабного вероятностного анализа безопасности ядерных установок, разрабатываемых по проектному направлению «Прорыв», без ограничений на размерность моделей ВАБ и с высоким быстродействием.

## **Литература**

1. Шишина Е.С., Морозов В.Б., Токмачев Г.В., Байкова Е.В., Чулухадзе В.Р., Федулов М.В. Вероятностный анализ безопасности проекта ВВЭР-ТОИ / Материалы конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «Гидропресс» 28-31 мая 2013 г. / Электронный ресурс. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/documents/mntk2013-075.doc>

2. Bakhmetyev A.M., Bylov I.A., Morev A.V. and Baklanov A.V. Developing of Safety Analysis and Monitoring Methods Applying to Small Modular Reactors, ASME 2014 Small Modular Reactors Symposium. / Электронный ресурс. URL:

<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1886993>

3. RiskSpectrum PSA. / Электронный ресурс. URL:

[http://www.riskspectrum.com/en/risk/Meny\\_2/RiskSpectrum\\_PSA](http://www.riskspectrum.com/en/risk/Meny_2/RiskSpectrum_PSA).

4. Бахметьев А.М., Былов И.А., Звягин Е.А., Абрамов Л.В. Программно-методическое обеспечение для вероятностного анализа безопасности объектов энергетики при разработке и эксплуатации / Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. - 1996. - № 3. - С. 136-142.

5. Бахметьев А.М., Былов И.А. К вопросу о системном исследовании безопасности ядерных установок с использованием вероятностных методов // Известия вузов. Ядерная энергетика - 2006. - №1 – С. 3-11.

6. Ершов Г.А., Ермакович Ю.Л., Парфентьев М.А. Программный комплекс «БАРС» для вероятностного анализа безопасности АЭС, Материалы конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «Гидропресс» 29 мая - 01 июня 2007. / Электронный ресурс. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/f130.pdf>

Поступила в редакцию 17.11.2015 г.

## **Авторы**

Абрамов Лев Викторович, инженер-конструктор

E-mail: [levabramov@okbm.nnov.ru](mailto:levabramov@okbm.nnov.ru)

Бахметьев Александр Михайлович, заместитель директора

E-mail: [alexbakh@okbm.nnov.ru](mailto:alexbakh@okbm.nnov.ru)

Былов Игорь Александрович, начальник подразделения

E-mail: [vab@okbm.nnov.ru](mailto:vab@okbm.nnov.ru)

Васюченков Андрей Александрович, ведущий инженер

E-mail: [vab@okbm.nnov.ru](mailto:vab@okbm.nnov.ru)

UDC 621.039.58:621.039.526

**DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF A SOFTWARE SYSTEM FOR PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS OF NUCLEAR INSTALLATIONS PROJECT DIRECTION «PRORYV»**Abramov L.V., Bakhmetyev A.M., Bylov I.A., Vasyuchenkov A.A.

JSCompany «Africantov OKB Mechanical Engineering»

15 Burnakovsky Proyezd, Nizhny Novgorod, 603074 Russia

## ABSTRACT

Implementing of the probabilistic safety analysis (PSA) presumes the development of complicated computer model of the nuclear plant along with comprehensive study of reliability and safety that requires appropriate software. In 2013 – 2015, JSC «Africantov OKBM» developed and verified the PSA software system CRISS 5.3 under the project «New generation codes» of the «Proryv» project area.

The main requirements for integrated PSA software system CRISS 5.3 were determined by the following features of nuclear plants developed under the «Proryv» project area in view of PSA, namely:

- complication of the logical-and-probabilistic models of the nuclear plant;
- taking account of the large scope of emergency sequences, including those with the low realization probabilities;
- analysis of reliability of accident high redundancy systems;
- reduction of the cutoff level for minimal cutest probabilities by several orders during the analysis.

In the course of software system CRISS 5.3 development, the experience in development and operation of PSA software for the Russian nuclear power plants was taken into account. The paper presents brief review and analysis of possibilities of the software (RiskSpectrum and CRISS 5.1) used for NPP power units PSA.

The developed software system CRISS 5.3 is briefly described. Using this software system, it is possible to implement the tasks of full-scale PSA, which is performed by fault tree and event tree methods. The program does not restrict PSA model site. Software system CRISS 5.3 is based on client-server architecture using common administered database where user rights to make changes are differentiated.

The results of software system CRISS 5.3 verification are given. The verification was done by comparison of results of analysis using CRISS 5.3 software with analytic formulae, as well as results of qualitative and quantitative analysis using certified PSA software for nuclear plants.

**Key words:** probabilistic safety analysis, nuclear installation, verification, software, fault tree, event tree.

## REFERENCES

1. Shishina E.S., Morozov V.B., Tokmachev G.V., Bajkova E.V., Chuluhadze V.R., Fedulov M.V. *Veroiatnostnyj analiz bezopasnosti proekta VVER-TOI* [Probabilistic safety analysis of VVER-TOI]. Materialy konferentsii «Obespechnie bezopasnosti AES proekta VVER-TOI [Proc. of the conference «Safety assurance of NPP with VVER»], Podolsk, 2013 (in Russian).
2. Bakhmetyev A.M., Bylov I.A., Morev A.V. and Baklanov A.V. *Developing of Safety Analysis and Monitoring Methods Applying to Small Modular Reactors*. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1886993>.
3. RiskSpectrum PSA Available at: [http://www.riskspectrum.com/en/risk/Meny\\_2/RiskSpectrum\\_PSA](http://www.riskspectrum.com/en/risk/Meny_2/RiskSpectrum_PSA).
4. Bakhmetev A.M., Bylov I.A., Zvyagin E.A., Abramov L.V. *Programmno-metodicheskoe*

*obespechenie dlya veroyatnostnogo analiza bezopasnosti ob"ektov energetiki pri razrabotke i ekspluatatsii* [Methods and software for probabilistic analysis of safety of energy facilities during development and operation]. Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva [Proc. Nizhny Novgorod state technical University n.a. R.E. Alekseev]. Nizhny Novgorod. 1996, no. 3, pp. 136–142 (in Russian).

5. Bakhmetev A.M., Bylov I.A. *K voprosu o sistemnom issledovanii bezopasnosti yadernykh ustanovok s ispol'zovaniem veroyatnostnykh metodov* [On the Problem of System Investigation of Nuclear Olant Safety Using Probabilistic Methods]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2006, no. 1, pp. 3–11 (in Russian).

6 Ershov G.A., Ermakovich Yu.L., Parfent'ev M.A. *Programmnyj kompleks BARS dlya veroyatnostnogo analiza bezopasnosti AES* [Software complex BARS for probabilistic safety assessment of NPP]. Materialy konferentsii «Obespechnie bezopasnosti AES proekta VVER» [Proc. of the conference «Safety assurance of NPP with VVER»], Podolsk, 2007.

Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/f130.pdf> (in Russian).

### Authors

Abramov Lev Viktorovich, Engineer

E-mail: [levabramov@okbm.nnov.ru](mailto:levabramov@okbm.nnov.ru)

Bakhmet'yev Alexandr Mihajlovich, Deputy Director

E-mail: [alexbach@okbm.nnov.ru](mailto:alexbach@okbm.nnov.ru)

Bylov Igor' Alexandrovich, Head of Department

E-mail: [vab@okbm.nnov.ru](mailto:vab@okbm.nnov.ru)

Vasyuchenkov Andrey Alexandrovich, Engineer

E-mail: [vab@okbm.nnov.ru](mailto:vab@okbm.nnov.ru)