

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441>

УДК 539.172:543.522

Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС

Е. П. Корсак¹⁾, В. А. Романко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Статья посвящена актуальным вопросам энергетической безопасности и управления рисками в атомной энергетике Республики Беларусь. Авторы рассматривают стратегическую значимость развития ядерной энергетики для обеспечения энергетической независимости страны, а также анализируют последствия крупных аварий на АЭС (Три-Майл-Айленд, Чернобыль, Фукусима), подчеркивая необходимость совершенствования методов оценки и минимизации рисков. Особое внимание уделено методологии вероятностного анализа безопасности (ВАБ), который применяется для анализа надежности систем, включая моделирование аварийных сценариев с использованием деревьев отказов. На примере системы фильтрации воды ААР атомной электростанции демонстрируется практическое применение метода: построены деревья отказов, рассчитана вероятность отказа системы и выявлены ключевые уязвимости (отказы электроснабжения насосов). Проведен сравнительный анализ методов оценки рисков (корректировка нормы дисконта, экспертные оценки, метод Монте-Карло и др.), выделены их преимущества и ограничения. Подчеркивается, что имитационное моделирование и ВАБ обеспечивают наиболее комплексный подход к управлению рисками, сочетая анализ технологических процессов и человеческого фактора. На основе результатов исследования предложены рекомендации по повышению надежности эксплуатации АЭС, включая регулярный мониторинг оборудования и усовершенствование систем безопасности.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, атомная энергетика, управление рисками, имитационное моделирование, вероятностный анализ безопасности, деревья отказов

Для цитирования: Корсак Е. П. Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС / Е. П. Корсак, В. А. Романко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 428–441. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441>

Simulation Modeling and Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plant Risk Management

K. P. Korsak¹⁾, V. A. Romanko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article is devoted to current issues of energy security and risk management in the nuclear energy industry of the Republic of Belarus. The authors examine the strategic importance

Адрес для переписки

Корсак Екатерина Павловна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 242-75-35
eo@bntu.by

Address for correspondence

Korsak Katsiaryna P.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 242-75-35
eo@bntu.by

of developing nuclear energy to ensure the country's energy independence, and also analyze the consequences of major accidents at nuclear power plants (Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima), emphasizing the need to improve methods for assessing and minimizing risks. Particular attention is paid to the methodology of probabilistic safety analysis (PSA), which is used to analyze the reliability of systems, including modeling emergency scenarios using fault trees. The practical application of the method is demonstrated using the example of the AAR water filtration system of a nuclear power plant: fault trees are constructed, the probability of system failure is calculated, and key vulnerabilities (pump power supply failures) are identified. A comparative analysis of risk assessment methods (adjustment of the discount rate, expert assessments, the Monte Carlo method, etc.) was conducted, and their advantages and limitations were highlighted. It is emphasized that simulation modeling and PSA provide the most comprehensive approach to risk management, combining the analysis of technological processes and the human factor. Based on the results of the study, recommendations are proposed to improve the reliability of nuclear power plant operation, including regular monitoring of equipment and improvement of safety systems.

Keywords: energy security, nuclear energy, risk management, simulation, probabilistic safety analysis, fault trees

For citation: Korsak K. P., Romanko V. A. (2025) Simulation Modeling and Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plant Risk Management. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 428–441. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441> (in Russian)

Введение

В настоящий момент многие страны, в том числе и Республика Беларусь, продолжают успешно эксплуатировать АЭС и приняли решение присоединиться к ядерному энергетическому сообществу. Развитие атомной энергетики имеет стратегическое значение для обеспечения энергетической безопасности и экономической независимости страны по целому ряду причин. Во-первых, оно позволяет значительно снизить зависимость от импорта энергоресурсов, диверсифицировать энергетический баланс и обеспечить стабильность энергоснабжения независимо от внешнеполитической конъюнктуры. Во-вторых, атомная энергетика дает существенные экономические преимущества – долгосрочную экономию на топливных затратах (всего 1 кг урана заменяет около 3 т угля), создает высокотехнологичные рабочие места и стимулирует развитие смежных отраслей промышленности, а также научно-технического прогресса. Важным аргументом в пользу развития атомной энергетики являются ее экологические преимущества. По сравнению с традиционной энергетикой АЭС обеспечивают существенное снижение выбросов CO₂ и минимизацию углеродного следа при производстве электроэнергии, что особенно актуально в контексте глобальных климатических изменений. Кроме того, современные ядерные технологии демонстрируют постоянное совершенствование – внедряются реакторы нового поколения с улучшенными характеристиками безопасности, развиваются технологии замкнутого ядерного топливного цикла, совершенствуются системы интеграции с возобновляемыми источниками энергии.

Таким образом, атомная энергетика представляет собой стратегический выбор, который сочетает в себе экономическую целесообразность, энергетическую безопасность и экологическую ответственность, что крайне важ-

но для обеспечения устойчивого развития страны в долгосрочной перспективе [1, 2].

К сожалению, крупные аварии в мировой ядерной энергетике, произошедшие в 1979 г. на АЭС Три-Майл-Айленд (США), в 1986 г. на Чернобыльской АЭС (СССР) и в 2011 г. на АЭС Фукусима-дайити (Япония), стали переломными моментами в восприятии атомной энергетики мировым сообществом. Каждая из этих катастроф, имея свою уникальную природу и последствия, продемонстрировала потенциальные риски, связанные с эксплуатацией ядерных объектов.

Авария на Три-Майл-Айленд (уровень 5 по шкале INES) выявила проблемы в проектировании систем безопасности и подготовке персонала. Чернобыльская катастрофа (уровень 7) стала беспрецедентной по масштабам радиационного загрязнения, показав опасность конструктивных недостатков реакторов РБМК. Фукусима (уровень 7) продемонстрировала уязвимость АЭС перед природными катаклизмами и важность учета внешних угроз. Эти события не только привели к человеческим жертвам, экологическому ущербу и огромным экономическим потерям, но и вызвали глубокий кризис доверия к ядерной энергетике со стороны населения и правительств многих стран.

Однако важно отметить, что каждая из этих катастроф привела к существенному совершенствованию систем безопасности, разработке новых протоколов и созданию более строгих регуляторных требований, что в целом повысило надежность современных ядерных технологий.

Основная часть

С вводом в эксплуатацию первой Белорусской атомной электростанции вопросы оценки и управления рисками приобрели статус приоритетных задач государственной важности. Атомная энергетика, обладая значительным потенциалом для экономического и энергетического развития, несет в себе серьезные риски, способные оказать долгосрочное влияние на здоровье населения, экологическую обстановку и безопасность страны. Последствия возможных инцидентов в этой сфере могут растянуться на десятилетия, нанося урон как человечеству, так и окружающей среде [1].

Прежде чем обсуждать подходы к управлению рисками, необходимо четко определить, что именно подразумевается под этим понятием. Понимание природы риска, его источников и факторов воздействия является ключом к разработке эффективных мер по его минимизации.

Фундаментальный принцип обеспечения безопасности базируется на обратной зависимости между вероятностью реализации нежелательного события и допустимой тяжестью его последствий: с ростом частоты возникновения аварийной ситуации требования к смягчению ее воздействий ужесточаются. Данная концепция формализуется через категорию риска, являющегося ключевым параметром в вероятностном анализе безопасности (ВАБ).

В методологии ВАБ риск количественно определяется как математическое ожидание ущерба, выражаемое произведением

$$R = PC,$$

где R – интегральный риск; P – вероятность возникновения события; C – ожидаемая величина последствий (ущерб).

Регламентирующие документы детализируют эту дефиницию, выделяя популяционный подход, – риск определяется как статистическая вероятность причинения вреда (включая радиационное воздействие), оцениваемая по частоте проявления негативных последствий в расчете на стандартизированную группу населения (случаев на миллион человек).

Существует огромное количество определений риска. В стандарте применяются следующие термины с соответствующими определениями: риск (risk) – сочетание вероятности события и его последствий [3]. Термин «риск» обычно используется тогда, когда существует хотя бы возможность негативных последствий. Анализ риска (risk analysis) – систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска. Анализ риска обеспечивает базу для его оценивания, мероприятий по снижению и принятию риска. Управление рисками (risk-менеджмент) – это процесс подготовки и реализации мероприятий, имеющих целью снизить опасность ошибочного решения и уменьшить возможные негативные последствия нежелательного развития событий в ходе реализации принятых решений [4]. Управление риском может включать мониторинг, переоценивание и соответствие принятым решениям. Первым шагом в управлении рисками является идентификация возможных рисков.

Выявление и идентификация рисков являются важным этапом, позволяющим сформировать эффективную систему управления рисками, так как только на четко обозначенный объект можно оказать управленческое воздействие, в то время как не выявленные риски могут оказать непредсказуемое, а в некоторых случаях и катастрофическое влияние на деятельность предприятия [5, с. 198]. На основе этой информации проводятся дальнейшие исследования и оценки, которые помогают понять, насколько вероятны те или иные события и каковы их возможные последствия.

Оценка потенциальных рисков производится простейшими методами, например корректировкой нормы дисконта или методом анализа чувствительности изменения основных показателей эффективности, закрепленных в Правилах по разработке бизнес-планов инвестиционных проектов, утвержденных постановлением Министерства экономики Республики Беларусь от 31.08.2005 № 158 (далее – Правила). Практика показывает их недостаточность. Иногда используются и более продвинутые методы оценки проектного риска, такие как имитационное моделирование, в частности метод Монте-Карло. При этом еще более редко встречаются такие «изолированные» методы оценки проектного риска, как метод ликвидационной стоимости, или риск-анализ, основанный на теории нечетких множеств. Основные преимущества, недостатки и область применения различных методов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Методы оценки рисков

Risk assessment methods

Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
Метод коррекции нормы дисконта	– основан на повышении исходной безрисковой ставки дисконтирования за счет включения дополнительной премии, отражающей уровень риска. Главным достоинством метода является минимальная трудоемкость расчетных процедур	– имеет ограничения возможностей моделирования различных вариантов; – чрезмерно чувствителен к изменениям в параметрах финансовой модели	– оценка инвестиционных проектов; – бизнес-планирование и стратегическое управление; – управление проектными рисками
Метод экспертных оценок	– создается группа экспертов, включающая профессионалов в области инвестиционного анализа, строительной отрасли и финансового менеджмента; – каждый участник экспертной группы независимо оценивает все категории рисков, формируя индивидуальные выводы по каждому из них	– дефицит профильных специалистов, способных проводить квалифицированную оценку; – субъективность результатов, обусловленная личным опытом и компетенциями привлекаемых экспертов; – потенциальное искажение данных из-за устойчивых когнитивных искажений в экспертной среде	– инвестиционный и финансовый анализ; – стратегическое планирование и маркетинг; – научные исследования и разработки; – риск-менеджмент
Анализ чувствительности	– не нуждается в привлечении дополнительных данных, используя только имеющиеся исходные параметры; – наглядно демонстрирует зависимость конечных результатов проекта от изменения ключевых входных переменных	– «тоннельный» анализ, игнорирующий синергетический эффект взаимовлияющих факторов; – искусственное выделение одного изменяемого параметра при неизменности прочих условий	– инвестиционный и финансовый анализ; – управление проектами; – стратегическое планирование; – научные исследования и разработки
Метод сценариев развития проекта	– формирует прозрачную сравнительную матрицу результатов для различных стратегий выполнения проекта; – выявляет степень влияния изменяющихся факторов на результирующие экономические показатели	– направленность исследования только на поведение результирующих показателей (NPV, IRR, PI); – отсутствие учета возможности отклонений потоков платежей	– управление проектами; – маркетинг; – производственная деятельность; – государственное управление и социальные проекты
Метод построения «дерева решений»	– предоставляет четкое графическое отображение различных сценариев развития проекта; – позволяет наглядно анализировать потенциальные изменения на всех этапах реализации; – служит эффективным инструментом для диагностики и решения проблемных ситуаций; – дает возможность проводить структурированный анализ сложных проектных задач; – обеспечивает количественную оценку финансовых последствий различных вариантов реализации	– характеризуется: повышенной трудоемкостью расчетных процедур; субъективностью при определении вероятностных характеристик; сложностями в достижении согласованных экспертных оценок	– для оценки рисков инвестиционного проекта, реализуемого в течение длительного времени и имеющего два или более последовательных решений

Окончание табл. 1

End of the Table 1

Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
Имитационное моделирование	– позволяет работать с входными данными со сложной структурой; – позволяет получить весьма надежные результаты, свидетельствующие об устойчивости и доходности проекта	– сложность выполнения вследствие необходимости количественной оценки вероятности для каждого риска; – сложность построения вероятностной модели и множества вычислений	– производство электроэнергии; – энергетические системы и сети; – возобновляемые источники энергии (ВИЭ);
Метод достоверных эквивалентов	– простота расчетов, доступность и понятность; – трудности исчисления коэффициентов достоверности, адекватных риску	– метод может быть неэффективен для высокоразмерных систем или при моделировании быстрых переходных процессов; – сложность разработки эквивалентных моделей; – зависимость от корректности исходных данных	– планирование развития энергосистем: оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления; – планирование развития энергосистем: оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления
Метод ликвидации стоимости и его сущность	– метод не учитывает потенциал компании как действующего предприятия; – в условиях кризиса или низкого спроса активы могут быть проданы с существенным дисконтом; – метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем	– трудоемкий по своей сущности метод и требует наряду с профессиональной командой разработчиков еще и квалифицированный штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов	– оценка риска, связанного с инвестициями в материальные активы – здания, оборудование, товарно-материальные ценности;
Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств	– позволяет работать с неполной информацией, что особенно важно на ранних этапах проекта; – теория нечетких множеств позволяет адаптироваться к изменениям факторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; – возможность объединения количественных и качественных данных	– создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; – полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качественные выводы	– анализ рисков при строительстве и эксплуатации энергетических объектов; – оценка надежности энергосистем, учет неопределенности в производстве и потреблении энергии
* Источник: собственная разработка [4, с. 197; 5; 6].			

Из данных таблицы видно, что наукой и практикой предлагается целый спектр методов для оценки рисков, каждый из которых имеет как свои преимущества, так и недостатки. Рассмотрим применение метода имитационного моделирования, основанного на методе Монте-Карло. Важной составляющей этого процесса является вероятностный анализ безопасности, позволяющий количественно оценить риски, связанные с эксплуатацией ядерных объектов, и предпринять меры для их минимизации. Вероятностный анализ безопасности помогает систематизировать данные о рисках и определить, какие сценарии развития событий представляют наибольшую опасность [6].

ВАБ становится все более важным инструментом для проверки детерминистских проектных решений. Он основан на оценке вероятностей отказа ядерной паропроизводящей установки путем разложения на независимые составляющие [7, 8]. Используемые методы дают принципиально новое представление о безопасности проекта и обладают рядом ключевых преимуществ, таких как:

- глубокий анализ технологических процессов, способствующий четкому пониманию взаимодействия оборудования и персонала как в штатных условиях, так и в аварийных ситуациях;
- комплексный подход, обеспечивающий всестороннюю оценку надежности установки и ее уровня безопасности.

Этот анализ позволяет получить более полное и объективное представление о рисках и устойчивости системы [9, 10]. ВАБ в сочетании с анализом запроектных аварий (ЗПА) формирует методологическую основу для:

- селекции аварийных сценариев, требующих разработки управляющих инструкций, на основании их значимого вклада в интегральные показатели безопасности;
- оптимизации защитных мероприятий, направленных на повышение безопасности энергоблока, посредством оценки влияния ключевых систем и оборудования на вероятностные индикаторы надежности.

Рассмотрим систему AAR, которая используется на атомных электрических станциях для фильтрации воды из водоема-охладителя и передачи ее потребителям. Система включает три аппаратных насоса с фильтрами (каждый производительностью 50 %), а также два насоса повышения давления (производительность 100 %). При нормальной эксплуатации в работе постоянно находятся два аппаратных насоса с фильтрами и один насос повышения давления. Технологическая схема системы приведена на рис. 1.

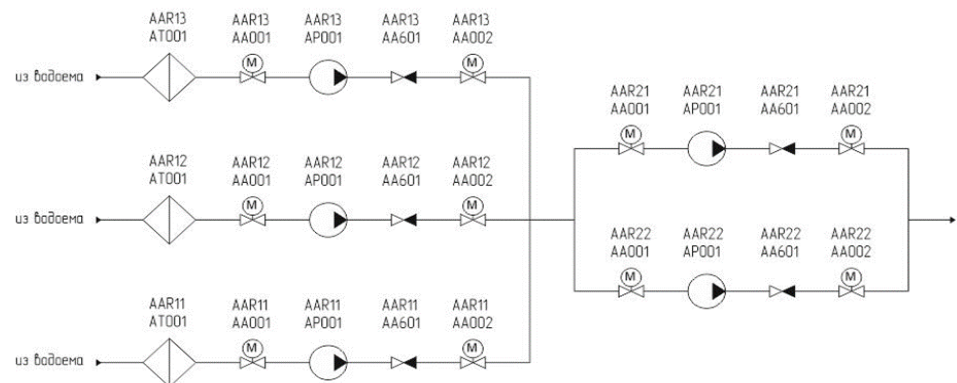


Рис. 1. Технологическая схема системы AAR
(источник: собственная разработка)

Fig. 1. Technological scheme of the AAR system
(source: own development)

Для разработки моделей надежности систем в настоящей работе принята широко используемая в мировой практике методология дерева отказов (ДО).

Графики ДО представляют собой логическую диаграмму в форме дерева (разомкнутого графа), которая включает следующие компоненты:

вершинное событие дерева (отказы системы); промежуточные события, подлежащие анализу в этом дереве; первичные (базисные) события (отказы элементов системы или ошибочные действия персонала) [11].

При моделировании системы не рассматриваются: отказы по общей причине на ложное изменение положения электроприводной арматуры (ЭПА); возможность образования рециркуляции через резервную ветку при ложном открытии ЭПА ввиду наличия обратных клапанов; неготовность оборудования из-за вывода в ремонт; не рассматриваются ошибки персонала (табл. 2).

Таблица 2

Базисные события, моделирующие рассматриваемые отказы

Basic events modeling the failures under consideration

№	Наименование элемента	Маркировка (KKS код)	Тип отказа	Вероятность отказа	Требуемое время работы, ч (Mission Time)	Модель отказа
1	2	3	4	5	6	7
1	Фильтр	AAR13AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
2	ЭПА на всасе насоса	AAR13AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
3	Насос с электроприводом	AAR13AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
4	ОК на напоре насоса	AAR13AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
5	ЭПА на напоре насоса	AAR13AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
6	Фильтр	AAR12AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
7	ЭПА на всасе насоса	AAR12AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
8	Насос с электроприводом	AAR12AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
9	ОК на напоре насоса	AAR12AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
10	ЭПА на напоре насоса	AAR12AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
11	Фильтр	AAR11AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
12	ЭПА на всасе насоса	AAR11AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)

Окончание табл. 2
End of the Table 2

1	2	3	4	5	6	7
13	Насос с электроприводом	AAR11AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
14	ОК на напоре насоса	AAR11AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
15	ЭПА на напоре насоса	AAR11AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
16	ЭПА на всасе насоса	AAR21AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
17	Насос повышения давления с электроприводом	AAR21AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
18	ОК на напоре насоса	AAR21AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
19	ЭПА на напоре насоса	AAR21AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
20	ЭПА на всасе насоса	AAR22AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
21	Насос повышения давления с электроприводом	AAR22AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
22	ОК на напоре насоса	AAR22AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
23	ЭПА на напоре насоса	AAR22AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)

Моделируются следующие функции, выполняемые системой: фильтрация и передача ее потребителям в течение 720 ч. Моделируемым функциям соответствуют следующие критерии успеха: Функция 1, считается выполненной, если в течение 720 ч в работе находятся два аппаратных насоса с фильтрами и один насос повышения давления, состояние арматуры обеспечивает поступление воды к потребителям рис. 2, 3.

В результате анализа деревьев отказов для моделируемой функции выявлены минимальные сечения отказов, которые представлены на рис. 4.

Среднее значение вероятности отказа системы по Функции 1 составляет 0,00046, что свидетельствует о том, что за 720 ч запланированной работы данной конфигурации до технического обслуживания отказ возможен один раз за 2200 периодов эксплуатации.

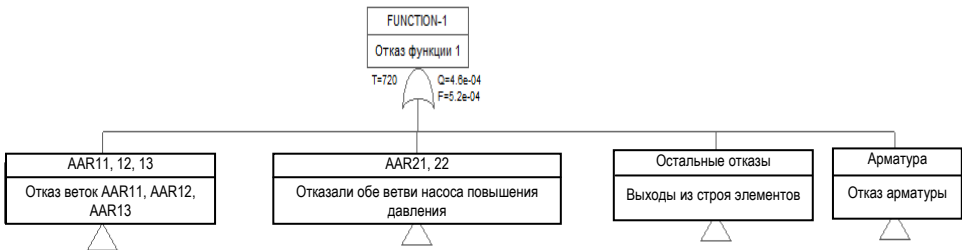


Рис. 2. Дерево отказа FUNCTION-1 – Отказ системы по Функции 1
(источник: собственная разработка)

Fig. 2. Fault tree FUNCTION-1 – System Failure Function 1
(source: own development)

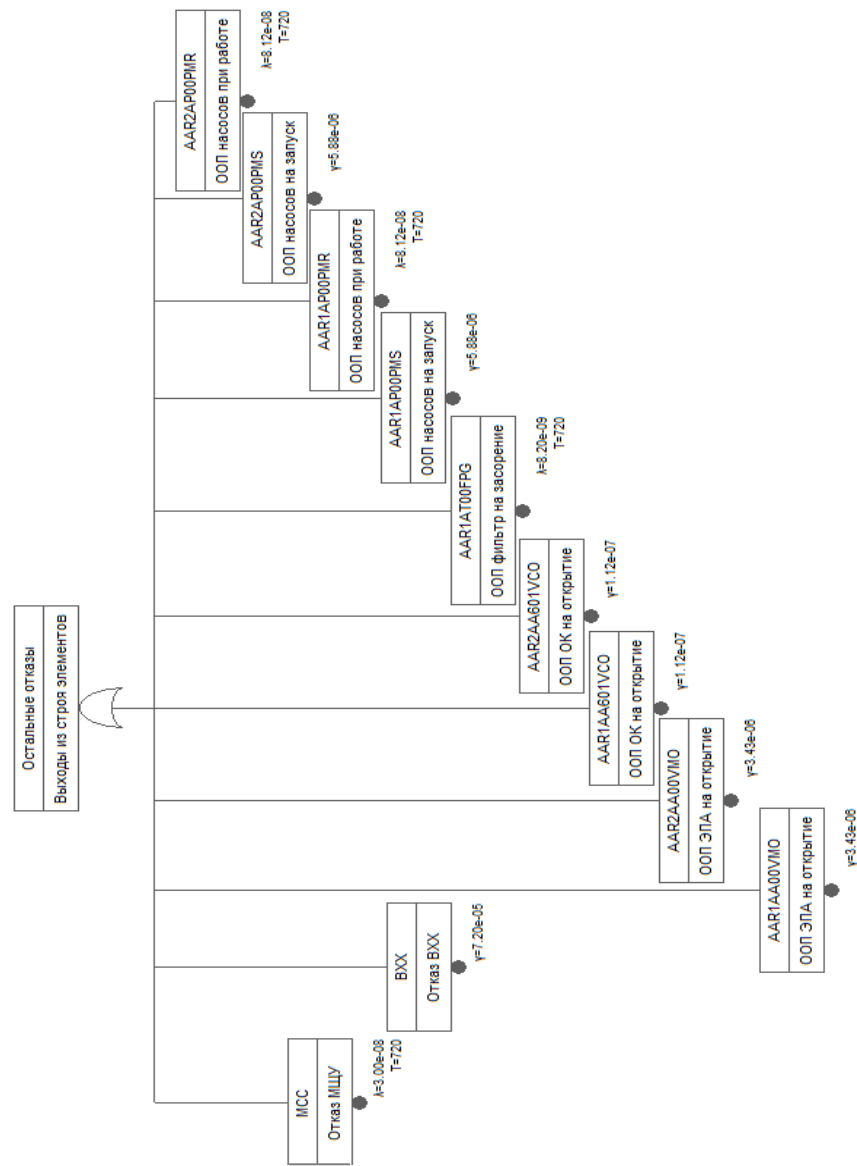


Рис. 3. Дерево отказа – Выходы из строя элементов (источник: собственная разработка)

Fig. 3. Fault tree – Failure of elements (source: own development)

Доминирующие минимальные сечения отказов системы по Функции 1 представлены на рис. 4.

XFTA calculations engine

Mission time: 720

Top gate: FUNCTION-1

Limit:

Exact calculation

Compute

Clipboard

Executive Summary									
		Probabilities	Minimal cuts set	Importance	Sensitivity				
#	Order	Q	%	W	Name	Description			
1	1	7.2e-05	15.4309	0.0	BXX	Отказ BXX			
2	1	5.84623e-05	12.529599999999999	8.11953e-08	AAR1AP001PMR	ООП насосов при работе			
3	1	5.84623e-05	12.529599999999999	8.11953e-08	AAR2AP001PMR	ООП насосов при работе			
4	2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR12AP001PMR	Отказ при работе насоса			
5	2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR13AP001PMR	Отказ при работе насоса			
6	2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR21AP001PMR	Отказ при работе насоса			
7	2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR22AP001PMR	Отказ при работе насоса			
8	1	2.15998e-05	4.62923	2.99994e-08	AAR11AP001PMR	Отказ при работе насоса			
9	1	5.90398e-06	1.2653299999999999	8.19995e-09	AAR13AP001PMR	Отказ при работе насоса			
10	1	5.88e-06	1.26019	0.0	MCC	Отказ МЩУ			
11	1	5.88e-06	1.26019	0.0	AAR1AT001FPG	ООП фильтр на засорение			
12	2	3.44063e-06	0.737391	9.54194e-09	AAR2AP001PMS	ООП насосов на запуск			
13	2	3.44063e-06	0.737391	9.54194e-09	AAR1AP001PMS	ООП насосов на запуск			

Рис. 4. Доминирующие минимальные сечения отказов системы по Функции 1 (источник: собственная разработка на основании расчетов)

Fig. 4. Dominant minimum failure cross-sections of the system according to Function 1 (Source: own development based on)

Результаты расчета показателей надежности системы ААР, которая используется на атомных электрических станциях для фильтрации воды из водоема-охладителя и передачи ее потребителям, показывают, что наибольший вклад в вероятность отказа системы по Функции 1 вносят отказы общего вида электроснабжения насосов и опор осевых подшипников (ООП) насосов при работе. По итогам анализа надежности системы рекомендуется: постоянно осуществлять техническое обслуживание и ремонт насосов; при обнаружении проблем с одним насосом проверять те же характеристики у остальных насосов (при допущении об их одинаковом производителе и конфигурации); постоянно осуществлять контроль за правильной работой электрической сети, которая питает насосы.

ВЫВОДЫ

1. Произведен анализ методов оценки риска, каждый из которых применяется для конкретного случая и обладает как преимуществами, так и недостатками.

2. Рассмотрен метод имитационного моделирования, к которому относится вероятностный анализ безопасности, построены деревья отказов для системы фильтрации воды из водоема-охладителя и подачи ее потребителю на атомных электрических станциях, рассчитано среднее значение вероятности отказа данной системы. Преимуществами данного метода оценки являются возможности работы с входными данными со сложной структурой и проведения анализа надежности систем, моделирование различных сценариев аварий и расчет вероятности их возникновения. Метод позволяет не только выявлять уязвимости, но и разрабатывать меры, обеспечивающие минимизацию возможных последствий.

3. Результаты расчета показателей надежности системы свидетельствуют о том, что наибольший вклад в вероятность отказа системы по Функции 1 вносит отказ электроснабжения насосов и опор осевых подшипников насосов при работе. По итогам анализа надежности системы рекомендуется: постоянно осуществлять техническое обслуживание и ремонт насосов; при обнаружении проблем с одним насосом проверять те же характеристики у остальных (при допущении об их одинаковом производителе и конфигурации); постоянно осуществлять контроль за правильной работой электрической сети, которая питает насосы [12, 14].

ЛИТЕРАТУРА

1. О присоединении Республики Беларусь к Конвенции о ядерной безопасности: Указ Президента Респ. Беларусь от 02.09.1998 № 430 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 11.05.2025).
2. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
3. Анализ риска технологических систем: ГОСТ Р 51901–2002. Введ. 07.06.2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 28 с.

4. Тымуль, Е. И. Инструменты риск-менеджмента / Е. И. Тымуль // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф., 30 марта 2017 г. / пред. редкол. С. Ю. Солодовников. Минск: БНТУ, 2017. С. 513–514.
5. Тымуль, Е. И. Энергетическая безопасность и управление рисками в энергетике Республики Беларусь / Е. И. Тымуль, Т. Ф. Манцерова, Е. П. Корсак. Минск: БНТУ, 2024. 260 с.
6. Назаров, В. И. Построение математической модели информационной системы для определения оптимального объема отображаемой информации в АСУ тп ТЭС / В. И. Назаров, Е. В. Пронкевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 1. С. 61–64.
7. Сорокин, В. В. неравномерности распределения пароводяного теплоносителя в засыпке тепловыделяющих частиц / В. В. Сорокин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 5. С. 89–96.
8. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением / С. М. Дмитриев, А. А. Баринев, А. Н. Пронин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 591–603. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603>.
9. Вероятностный анализ безопасности. Минск, 2024. URL: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/628/razdel-6-veroyatnostnyy-analiz-bezopasnosti.pdf> (дата обращения: 11.05.2025).
10. Кузнецова, Е. А. Формирование реестра опасностей для оценки рисков / Е. А. Кузнецова // Безопасность и охрана труда. 2016. № 4 (69). С. 28–29.
11. Котлярова, Е. А. Оперативное управление рисками при реализации инвестиционно-строительных проектов: на примере строительства объектов газовой промышленности: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Е. А. Котлярова; Гос. ун-т упр. М., 2010. 181 л.
12. Острейковский, В. А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 352 с.
13. Гриненко, В. А. Физическая защита радиационно-опасных объектов. Инженернотехнические средства охраны / В. А. Гриненко, А. И. Коростелев. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 252 с.
14. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций» (РБ-100-15). М., 2015. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766033.htm> (дата обращения: 11.05.2025).

Поступила 12.05.2025 Подписана в печать 15.07.2025 Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. On the Accession of the Republic of Belarus to the Convention on Nuclear Safety: Decree of the President of the Republic of Belarus dated 02.09.1998 г. № 430. *ETALON: Information retrieval System* (accessed 11 May 2025) (in Russian).
2. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
3. State Standard P 51901-2002. *Risk Analysis of Technological Systems*. Moscow, Publishing House of Standards, 2002. 28 (in Russian).
4. Tymul E. I. (2017) Risk Management Tools. *Modernization of the Economic Mechanism through the Prism of Economic, Legal, Social and Engineering Approaches: Collection of materials of the 10th International Scientific and Practical Conference, March 30, 2017*. Minsk, Belarusian National Technical University, 513–514 (in Russian).
5. Tymul E. I., Mantserova T. F., Korsak E. P. (2024) *Energy Security and Risk Management in the Energy Sector of the Republic of Belarus*. Minsk, Belarusian National Technical University. 260 (in Russian).

6. Nazarov V. I., Pronkevich E. V. (2008) Development of Mathematical Model for Data System Applied for Determination of Optimum Information Body Reflected in Automatic Control System TP at Thermal Power Station. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 61–64 (in Russian).
7. Sorokin V. V. (2014) Non-Uniformities of Two-Phase Coolant Distribution in a Heat Generating Particles Bed / V. V. Sorokin. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 89–96 (in Russian).
8. Dmitriev S. M., Barinov A. A., Pronin A. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 591–603. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603> (in Russian).
9. *Probabilistic Safety Analysis*. Minsk, 2024. Available at: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/628/razdel-6-veroyatnostnyy-analiz-bezopasnosti.pdf> (accessed 11 May 2025) (in Russian).
10. Kuznetsova E. A. (2016) Formation of a Hazard Register for Risk Assessment. *Bezopasnost i Okhrana Truda = Safety and labor protection*, (4), 28–29 (in Russian).
11. Kotlyarova E. A. (2010) *Operational Risk Management in the Implementation of Investment and Construction Projects: on the Example of the Construction of Gas Industry Facilities* [Dissertation]. Moscow, State University of Management. 181 (in Russian).
12. Ostreykovsky V. A., Shvyryaev Yu. V. (2008) *Safety of Nuclear Power Plants. Probabilistic Analysis*. Moscow, FIZMATLIT Publ. 352 (in Russian).
13. Grinenko V. A., Korostelyov A. I. *Physical Protection of Radiation Hazardous Objects. Engineering and Technical Means of Protection*. Moscow, National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute. 252 (in Russian).
14. *Safety Guide for the Use of Nuclear Energy “Recommendations on the Procedure for Conducting Reliability Analysis of Nuclear Power Plant Systems and Elements Important to Safety and Their Functions”* (RB-100-15). Moscow, 2015. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766033.htm> (accessed 11 May 2025) (in Russian).

Received: 12 May 2025

Accepted: 15 July 2025

Published online: 30 September 2025