

М. Х. Гашев¹, Ю. А. Зинченко²,
Н. А. Стефанишин²

¹Государственная инспекция ядерного регулирования
Украины, г. Киев, Украина

²Государственный научно-технический центр по ядерной
и радиационной безопасности, г. Киев, Украина

Разработка независимых обобщенных вероятностных моделей для целей регулирующей деятельности

Рассматриваются вопросы, связанные с созданием вероятностных моделей для использования в регулирующей деятельности. Представлены результаты разработки независимых обобщенных моделей ВАБ 1-го уровня для целей риск-ориентированного регулирования Госатомрегулирования Украины.

Ключевые слова: вероятностный анализ безопасности, риск-ориентированные подходы, регулирующая деятельность.

М. Х. Гашев, Ю. А. Зінченко, М. О. Стефанішин

Розробка незалежних узагальнених імовірнісних моделей для цілей регулюючої діяльності

Розглядаються питання, пов'язані зі створенням імовірнісних моделей для їх використання у регулюючій діяльності. Подано результати розробки незалежних узагальнених моделей ІАБ 1-го рівня для цілей ризик-орієнтованого регулювання Держатомрегулювання України.

Ключові слова: імовірнісний аналіз безпеки, ризик-орієнтовані підходи, регулююча діяльність.

В последние десятилетия в области анализа безопасности атомных электрических станций широко распространение получили вероятностные методы оценки безопасности [1–4]. При такой оценке используются несколько основных типов подходов: подходы, основанные на риске (Risk-Based Approach); подходы, ориентированные на информацию о риске (Risk-Informed Approach) либо ориентированные на конечный результат (Performance-based Approach) [5]. Для целей регулирования безопасности ядерных установок в Украине предписано использование риск-ориентированных подходов [6], в которых используются результаты оценок риска в сочетании с традиционными детерминистическими анализами, чтобы сконцентрировать внимание регулирующего органа и лицензиата на проектных и эксплуатационных проблемах в зависимости от их важности для безопасности и влияния на здоровье населения [7, 8], а также на выявленных в процессе оценки дефицитах безопасности.

В данной статье рассматривается один из специфических вопросов, связанных с применением вероятностных методов анализа безопасности при принятии регулирующих решений, а именно мировая практика разработки вероятностных моделей энергоблоков с целью их использования в риск-ориентированном регулировании, а также первый опыт разработки независимых обобщенных вероятностных моделей для регулирующей деятельности Госатомрегулирования Украины.

В международной практике принятие решений регулирующего характера основывается на результатах регулирующих проверок и оценок. Согласно требованиям МАГАТЭ [9], решения, касающиеся безопасности, следует принимать как на основе проверок и оценок материалов, предоставляемых эксплуатирующей организацией (лицензиатом), так и на основе исследований и оценок, выполненных независимо самим регулирующим органом. Данные общие требования к проведению проверок в различных странах реализуются по-разному, что обусловлено сложившейся практикой регулирующих органов ядерной энергетики этих стран, и одним из инструментов проведения проверок является создание и использование независимых моделей вероятностного анализа безопасности (ВАБ) с целью их использования в регулировании.

Например, STUK (орган по надзору за радиационной и ядерной безопасностью Финляндии) считает, что работы по ВАБ служат полезной платформой для взаимодействия между лицензиатом и регулирующим органом [9]. Соответственно, модели ВАБ, разработанные лицензиатами и проверенные STUK, используются в решении проблем безопасности обеими сторонами. Для этого лицензиат обеспечивает регулирующий орган моделями ВАБ в электронной форме, регулярно поддерживает и обновляет их. STUK согласовывает данные модели после прохождения процесса экспертизы.

Наиболее широкое применение вероятностных моделей, специально разработанных для регуляторной деятельности, характерно для Комиссии по ядерному регулированию США (U.S. Nuclear Regulatory Commission, USNRC). В связи со значительным количеством эксплуатируемых энергоблоков в США и отличиями в их типах, оценка риска регулятором выполнялась различными группами персонала USNRC, которые зачастую предъявляли различные технические требования к используемым вероятностным моделям, в том числе и по внесению в них изменений, что привело к наличию у регулятора большого количества

версий аналогичных моделей ВАБ. Поэтому было принято решение о разработке и внедрении Программы стандартизированного анализа риска АЭС (Standardized Plant Analysis Risk — SPAR) для того, чтобы создать стандартные процедуры и усовершенствовать методы оценки риска в различных риск-ориентированных регулирующих приложениях [11, 12]. Кроме того, стандартизированные методы оценки риска используются для сокращения времени выполнения обычных анализов риска эксплуатационных событий и проблемных вопросов с эксплуатационными показателями риска.

На текущий момент SPAR включает Программу оценки эксплуатационных событий-предшественников аварий (Accident Sequence Precursor Program, ASP) [13, 14] и Процедуру определения значимости выявленных недостатков в процессе инспекционных проверок (Significance Determination Process, SDP) [15].

Вероятностные модели, используемые в SPAR, представляют собой стандартизированные модели риска, в которых использована методология связывания деревьев событий и деревьев отказов. Эти модели построены на стандартном методе разработки деревьев событий, а также стандартном наборе входных данных для частот исходных событий аварий (ИСА), показателей надежности оборудования и вероятности ошибочных действий персонала. При необходимости, в отдельных случаях, стандартный набор данных модифицируется, чтобы лучше отображать специфику АЭС или определенного энергоблока. Системные деревья отказов, содержащиеся в моделях SPAR, выполнены с меньшей степенью детализации, чем деревья отказов в ВАБ.

На сегодняшний момент персонал USNRC имеет в своём распоряжении 77 SPAR-моделей, которые отображают собой все 104 энергоблока, находящихся в США в коммерческой эксплуатации.

Отметим, что разработанные модели [15] включают только внутренние исходные события при работе энергоблока на номинальной мощности. В настоящее время в стандартных моделях USNRC задокументированы следующие ИСА:

- потеря внешнего энергоснабжения;
- разрыв трубок парогенератора;
- разрыв и течи через границы первого контура;
- аварии с потерей теплоносителя вследствие разрывов различного диаметра или ложного открытия и неспадки импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления;
- разрыв трубопроводов второго контура;
- переходные процессы.

В качестве дальнейшего развития SPAR в США предпринимается разработка вероятностных моделей для внутренних пожаров и затоплений, внешних исходных событий (включая землетрясения) и внутренних исходных событий для энергоблоков в состоянии останова.

В *Украине* до последнего времени не использовалась практика применения регулирующим органом в своей деятельности независимых от отраслевых вероятностных моделей. Но в 2009 г. в ГНТЦ ЯРБ по заданию Госатомрегулирования Украины [19] была инициирована разработка независимой обобщенной модели ВАБ 1-го уровня для внутренних инициаторов при работе энергоблока на номинальном уровне мощности. Причиной принятия решения о начале разработки этой модели стало то, что при проведении государственных экспертиз ядерной и радиационной безопасности материалов по обоснованию

и анализу безопасности энергоблоков АЭС, оценке влияния на безопасность внедряемых на энергоблоках АЭС модификаций, а также при использовании риск-информированных подходов в регулирующей деятельности важной частью работ является выполнение проверочных расчетов для оценки корректности предоставленных лицензиатом материалов. Поэтому данная модель разрабатывалась с целью ее использования Госатомрегулированием в качестве независимой расчетной модели для таких видов работ.

По требованию Госатомрегулирования, одной из основных задач, связанных с выполнением этой работы, должен был стать сбор исходных данных для создания вероятностной модели и анализ существующих современных методологий ВАБ в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, референтными уровнями WENRA и лучшим международным и отечественным опытом выполнения ВАБ для энергоблоков АЭС.

В конце 2010 г. независимая обобщенная вероятностная модель ВАБ 1-го уровня для внутренних инициаторов при работе энергоблока на номинальном уровне мощности была создана [20, 21] после анализа отраслевых моделей с целью определения подходов и лучшего опыта по уменьшению консерватизма моделирования и получения сбалансированного профиля риска. Вероятностная модель разработана для международно признанного и апробированного расчетного кода SAPHIRE с использованием рекомендаций разработчика кода, а также имеющегося отечественного и международного опыта создания моделей ВАБ 1-го уровня.

Модель включает в себя все необходимые компоненты для выполнения расчетов, включая деревья отказов (анализ технологических систем энергоблока) и деревья событий (анализ аварийных последовательностей для выбранных ИСА). В отличие от регуляторных моделей USNRC [15], в данной модели рассмотрены все категории внутренних ИСА данного исследования ВАБ: течи первого контура, переходные процессы и специальные инициаторы.

В качестве базового энергоблока для разработки независимой модели по согласованию с Госатомрегулированием выбран энергоблок № 5 Запорожской АЭС типа ВВЭР-1000/В-320. Отметим, что из 15 энергоблоков, эксплуатируемых в настоящее время в Украине, 11 принадлежат к данному типу, для семи из них энергоблок № 5 Запорожской АЭС является «пилотным». При этом, по требованию Госатомрегулирования, выполнен анализ существующих отличий между энергоблоками такого типа украинских АЭС с целью создания обобщенной вероятностной модели, а также дополнительный сбор данных для обновления и обобщения частот ИСА и анализ внедренных на энергоблоках АЭС Украины мероприятий по повышению безопасности для отображения в вероятностной модели наиболее значимых из них. По результатам этой работы в базовую вероятностную модель внесены такие основные изменения:

для учета основного отличия между энергоблоком № 5 ЗАЭС и другими однотипными энергоблоками АЭС Украины, связанного с отсутствием ОРДЭС на энергоблоках №№ 1—4 Запорожской АЭС, № 3 Ровенской АЭС и № 1 Хмельницкой АЭС, в деревья отказов систем, имеющих связи с ОРДЭС, инкорпорирован оператор переключения и создан набор признаков, с помощью которого осуществляется управление оператором переключения, что позволяет отобразить в модели обе существующие конфигурации энергоблоков АЭС Украины;

внесены необходимые изменения в модель, связанные с внедрением на энергоблоках АЭС Украины таких

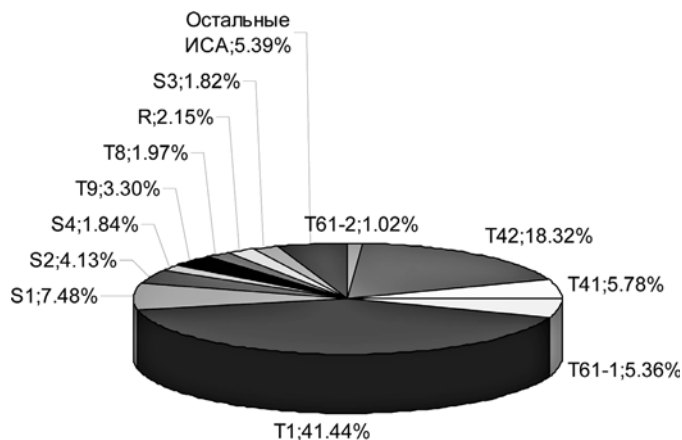


Рис. 1. Вклад ИСА в суммарную ЧПАЗ для конфигурации энергоблока без ОРДЭС

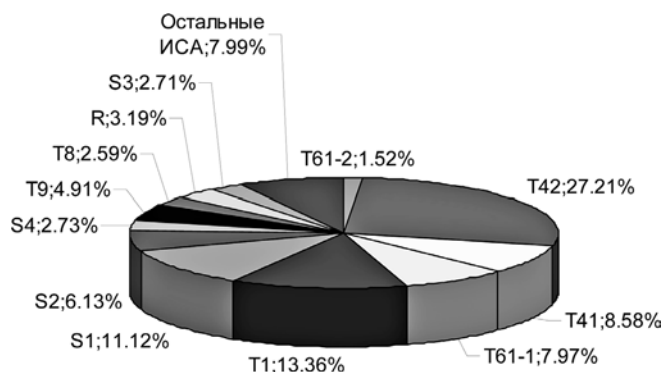


Рис. 2. Вклад ИСА в суммарную ЧПАЗ для конфигурации энергоблока с наличием ОРДЭС

мероприятий, как: замена ИПУ КД для принудительного снижения давления в первом контуре для выполнения процедуры «сброс—подпитка» по первому контуру; автоматический ввод в работу регуляторов уровня в парогенераторах от аварийной питательной воды; замена аккумуляторных батарей на системах безопасности на батареи фирмы VARTA с большей емкостью, что позволяет увеличить время работы при полном обесточивании блока; замена паросбросных устройств 2-го контура на оборудование, сертифицированное для работы на двухфазной среде;

в ограниченном объеме, путем пересмотра данных по надежности персонала, учтено внедрение симптомно-ориентированных аварийных инструкций (СОАИ) и дополнительное обучение персонала на полномасштабных тренажерах по управлению авариями, которые вносили доминирующий вклад в частоту повреждения активной зоны (например, течи из первого контура во второй);

в модели учтена работоспособность оборудования, важного для безопасности, для которого существует угроза независимых отказов при возникновении ИСА;

обобщена статистика аномальных событий для 6 энергоблоков площадки Запорожской АЭС, а также использованы в качестве обобщенных данные по аномальным событиям и инцидентам, идентифицированные как ИСА на энергоблоках № 1 Хмельницкой АЭС и № 3 Ровенской АЭС, переоценены частоты ИСА.

При апробации разработанной модели были получены профили риска для двух конфигураций энергоблока ВВЭР-1000/В-320 — в случае отсутствия ОРДЭС в проекте блока и при их наличии (рис. 1 и 2).

Параллельно с выполнением второго этапа по разработке вероятностной модели для номинального уровня мощности, Госатомрегулирование поручило ГНТЦ ЯРБ [23] разработку аналогичной модели для работы энергоблока на пониженном уровне мощности и в состоянии останова, что позволило бы получить регулирующему органу независимые модели, охватывающие все режимы эксплуатации энергоблока. В 2010 г. был выполнен первый этап, связанный со сбором исходных данных для разработки данной вероятностной модели [24], а в 2011 г. завершена, апробирована и предоставлена Госатомрегулированию разработанная вероятностная модель с отчетными документами по ее описанию [25]. С точки зрения отличий данной модели от существующих в отрасли можно отметить следующее:

модель для работы энергоблока на пониженном уровне мощности и в состоянии останова разработана на основе модели для номинального уровня мощности, поэтому содержит все особенности данной модели, описанные выше;

в части исходных данных модель актуализирована на состояние энергоблоков на конец 2010 г. благодаря учету всех значимых отраслевых мероприятий по повышению безопасности для энергоблоков ВВЭР-1000/В-320, выполненных к этому времени;

с целью обобщения модели проанализированы и обобщены данные по длительности эксплуатационных состояний, перечню и частотам ИСА по всем энергоблокам ВВЭР-1000/В-320 в соответствии с информацией, содержащейся в материалах ВАБ «пилотных» и «непилотных» энергоблоков.

Выводы

По результатам выполненных работ Госатомрегулирование Украины получило апробированные независимые обобщенные вероятностные модели ВАБ 1-го уровня для внутренних инициаторов при работе энергоблока типа ВВЭР-1000/В-320 на номинальном уровне мощности, а также на пониженном уровне мощности и в состоянии останова с их техническим описанием.

Данная работа представляет собой первый опыт разработки вероятностных моделей для целей регулирующей деятельности на постсоветском пространстве и соответствует ведущей мировой практике применения вероятностных методов анализа безопасности при принятии регулирующих решений.

Разработанные вероятностные модели удовлетворяют всем необходимым условиям для их применения в тех целях, которые были определены при постановке задачи [19, 23]. После проведенного обучения [21] сотрудники Госатомрегулирования имеют необходимые навыки применения моделей на практике.

Дальнейшим развитием данной работы является поддержание разработанных моделей в актуальном состоянии, а также расширение спектра ИСА, учитываемых в моделях, таких как внутренние и внешние экстремальные воздействия.

Параллельным путем развития данного направления исследований может считаться создание альтернативной вероятностной модели на базе расчетного вероятностного кода RiskSpectrum, который при сходной с кодом SAPHIRE функциональности имеет ряд преимуществ в части разработки интегральных моделей ВАБ и оперативного ВАБ,

что является актуальной в отрасли задачей. Предложение по разработке данной альтернативной модели было внесено в проект перспективного плана выполнения научно-исследовательских и исследовательско-конструкторских работ ГНТЦ ЯРБ на 2012—2014 гг. для включения в план прикладных исследований Госатомрегулирования на этот период.

Список использованной литературы

1. Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants. IAEA SAFETY GUIDE No. GS-G-4.1.
2. NUREG/CR-2300. PRA (Probabilistic Risk Assessments) Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants.
3. Рішення Колегії Держатомрегулювання України № 9 «з питань застосування оцінки ризиків в регулюванні безпеки ядерних установок» від 13.11.2001.
4. Общие положения безопасности атомных станций (НП 306.2.141—2008). — Утвержд. приказом Гос. комитета ядерного регулирования Украины 19.11.2007 № 162. — К., 2008. — 72 с.
5. Nuclear Regulatory Commission. Staff Requirements — SECY-98—144 —White Paper on Risk-Informed and Performance-Based Regulation. — Washington: DC, March 1999.
6. Застосування ризик-орієнтованих підходів у діяльності по регулюванню безпеки АЕС України. Основні положення (НП 306.2.01.1—05) / Державний комітет ядерного регулювання України. — К., 2005.
7. Программа внедрения риск-ориентированных подходов в регулирующей деятельности и эксплуатации АЭС Украины / ГП НАЭК «Энергоатом», Госатомрегулирования Украины. — Ред. 2. — К., 2007.
8. Васильченко В. Н. Использование риск-ориентированных подходов в регулирующей деятельности и эксплуатации АЭС Украины / В. Н. Васильченко, Г. В. Громов, А. Е. Севбо, С. Э. Шоломицкий // Ядерна та радіаційна безпека. — 2008. — № 3. — С. 7—11.
9. Оценка безопасности и независимая проверка для атомных электростанций. Руководство МАГАТЭ по безопасности NS-G-1.2. — Вена: МАГАТЭ, 2004.
10. Reino Virolainen and Kaisa Simola, Chapter 60. Risk-Informed Licensing, Regulation, and Safety Management of NPPs in Finland.
11. Risk Assessment Standardization Methods for Risk-Informed Regulatory Applications / S. M. Wong, et al. // ANS PSA '05 Topical Meeting, San Francisco, California, September 11—15, 2005.
12. Wong S. M. Risk Assessment Standardization Project (RASP) Handbook for risk assessment of operational events / S.M. Wong, D.G. Marksberry, and F.P. Bonnett // ANS PSA 2008 Topical Meeting — Challenges to PSA during the nuclear renaissance, Knoxville, Tennessee, September 7—11, 2008.
13. Status of the Accident Sequence Precursor (ASP) Program and the Development of Standardized Plant Analysis Risk (SPAR) Models / U. S. Nuclear Regulatory Commission. — SECY-07—0176, 2007.
14. NRC Incident Investigation Program / U. S. Nuclear Regulatory Commission. — Management Directive 8.3, 2001.
15. Determining the Significance of Reactor Inspection Findings for At-Power Situations / U. S. Nuclear Regulatory Commission. — Inspection Manual Chapter 0609A 2008.
16. Risk Assessment of Operational Events. Handbook: Volume 1 / U. S. Nuclear Regulatory Commission. — Internal Events. Rev1.03, 2009.
17. Громов Г. В. Применение риск-информированных подходов в инспекционной деятельности / Г. В. Громов, А. М. Дыбач, А. Е. Севбо, М. Х. Гашев, В. С. Бойчук // Ядерна та радіаційна безпека. — 2010. — № 3. — С. 9—15.
18. Dybach O. Pilot projects of Risk Informed Decision Making in the regulatory activities in Ukraine / O. Dybach. — Kyiv: SSTC NRC, 2011. — (Материалы презентации ТАІЕХ, INFRA 43564).
19. Технічне завдання на створення науково-технічної продукції «Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки АЕС із ВВЕР-1000/320 1-го рівня стосовно внутрішніх ініціаторів»: Додаток 1 до договору № 03/1.ІН-2009 від 20.11.2009.
20. Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки АЕС із ВВЕР-1000/320 1-го рівня стосовно внутрішніх ініціаторів. Підготовка вихідних даних: Звіт про науково-дослідну роботу (проміжний). — К.: ДНТЦ ЯРБ, 2009.
21. Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки АЕС із ВВЕР-1000/320 1-го рівня стосовно внутрішніх ініціаторів. Модель та її технічний опис: Звіт про науково-дослідну роботу (заключний). — К.: ДНТЦ ЯРБ, 2010.
22. Звіт про проведення навчання співробітників Держатомрегулювання за результатами науково-дослідної роботи «Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки АЕС із ВВЕР-1000/320 1-го рівня стосовно внутрішніх ініціаторів». — К.: ДНТЦ ЯРБ, 2010.
23. Технічне завдання на створення науково-технічної продукції «Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки 1-го рівня від внутрішніх ініціаторів на зниженому рівні потужності та у стані останову для енергоблока ВВЕР-1000/В-320»: Додаток 1 до договору № 03/6—2010/10—12 від 20.10.2010.
24. Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки АЕС із ВВЕР-1000/320 1-го рівня стосовно внутрішніх ініціаторів на зниженому рівні потужності та у стані останову для енергоблока ВВЕР-1000/В-320. Підготовка вихідних даних: Звіт про науково-дослідну роботу (проміжний). — К.: ДНТЦ ЯРБ, 2010.
25. Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки АЕС із ВВЕР-1000/320 1-го рівня стосовно внутрішніх ініціаторів на зниженому рівні потужності та у стані останову для енергоблока ВВЕР-1000/В-320. Модель та її технічний опис: Звіт про науково-дослідну роботу (заключний). — К.: ДНТЦ ЯРБ, 2011.

Отримано 17.10.2011.